ISSN 0869–7698

ВЕСТНИК ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

2
2024

300 лет Российская Академия Наук

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

НАУКА
1727

ВЕСТНИК

Научный журнал

Учредители
РАН
ДВО РАН

Журнал основан в 1932 г.
Издание прекращено в 1939 г.,
возобновлено в 1990 г.

ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

2(234). 2024

СОДЕРЖАНИЕ

VESTNIK

Scientific journal

OF THE FAR EAST BRANCH

Founders
RAS
FEB RAS

OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

The journal was found in 1932
The publication was discontinued in 1939,
was resumed in 1990

2 (234). 2024

CONTENTS

Научная статья
УДК 551.466.62
DOI: 10.31857/S0869769824020013
EDN: ldxcct

Деформационный метод прогноза цунами

Г.И. Долгих✉, С.Г. Долгих

Григорий Иванович Долгих
академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток, Россия
dolgikh@poi.dvo.ru
http://orcid.org/0000-0002-2806-3834

Станислав Григорьевич Долгих
доктор технических наук
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток, Россия
sdolgikh@poi.dvo.ru
http://orcid.org/0000-0001-9828-5929

Аннотация. На основе анализа многочисленных данных по вариациям деформаций земной коры, полученных с помощью лазерного деформографа, обнаружены деформационные аномалии (скачки деформации), возникающие при генерации цунами. Скачки деформации, зарегистрированные лазерным деформографом, вызваны подвижками дна, приводящими к образованию цунами. По данным многих зарегистрированных цунамигенных землетрясений рассчитаны коэффициенты затухания выделенных деформационных аномалий по четырем регионам планеты.

Ключевые слова: землетрясение, цунами, лазерный деформограф, скачок деформации

Для цитирования: Долгих Г.И., Долгих С.Г. Деформационный метод прогноза цунами // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 2. С. 5–16. http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020013, EDN: ldxcct.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 22-27-00678 «Микродеформации земной коры, вызванные морскими инфрагравитационными волнами по данным лазерно-интерференционных приборов».

Original article

Deformation method of tsunami prediction

G.I. Dolgikh, S.G. Dolgikh

Grigory I. Dolgikh
Academician of RAS, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor
V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
dolgikh@poi.dvo.ru
http://orcid.org/0000-0002-2806-3834

Stanislav G. Dolgikh
Doctor of Sciences in Technique
V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
sdolgikh@poi.dvo.ru
http://orcid.org/0000-0001-9828-5929

Abstract. Based on the analysis of numerous data on variations of deformations of the Earth's crust obtained using a laser strainmeter, deformation anomalies (deformation jumps) that occur during tsunami generation have been detected. The deformation jumps recorded by the laser strainmeter are caused by bottom movements leading to the formation of a tsunami. According to the data of many registered tsunamigenic earthquakes, the attenuation coefficients of the identified deformation anomalies for four regions of the planet have been calculated.

Keywords: earthquake, tsunami, laser strainmeter, deformation jump

For citation: Dolgikh G.I., Dolgikh S.G. Deformation method of tsunami prediction. *Vestnik of the FEB RAS.* 2024;(2): 5–16. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020013, EDN: ldxcct.

Funding. The work was carried out with the financial support of the RGNF, grant N22-27-00678 «Micro-deformations of the earth's crust caused by marine infragravity waves according to laser interference devices».

Введение

Известно, что одним из самых опасных катастрофических явлений Земли является цунами, которое наносит значительный экономический ущерб и служит причиной больших человеческих жертв. В качестве характерного примера можно привести цунами, которое возникло 26 декабря 2004 г. в Индийском океане и унесло жизни более 283 000 человек. Оно было вызвано мощным землетрясением с максимальным значением магнитуды около 9,3 [1]. От действия цунами страдают различные регионы планеты, но в наибольшей степени это касается Японии. Учитывая, в какой степени Япония подвержена воздействию землетрясений и цунами, а также ее высокое научно-техническое развитие, можно ожидать, что в данном регионе планеты будут сосредоточены передовые научно-технические разработки, направленные на прогноз возникновения и развития землетрясений и цунами. Если проблема краткосрочного прогноза землетрясений далека от своего решения, то задача обнаружения момента возникновения цунами кажется вполне решаемой. Японские острова и окружающие их акватории «напичканы» различными сейсмостанциями, GPS-приемниками, донными сейсмостанциями и высокоточными измерителями уровня моря/океана. Но тем не менее события 2011 г. в еще большей степени «оголили» проблемы краткосрочного прогноза цунами.

В настоящее время традиционный метод краткосрочного прогнозирования цунами основан на сейсмологической информации (магнитуде землетрясения, времени главного толчка и местоположении эпицентра) [2]. Магнитуда землетрясения, превышающая установленное пороговое значение, различное для разных цунамигенных зон, обычно приводит к выдаче предупреждения о цунами. Такой подход, основанный на «магнитудно-географическом принципе», прост: он обеспечивает небольшое количество пропусков цунами, но и дает ложные тревоги. Большинство действующих систем раннего предупреждения о цунами основаны на сейсмических данных.

Недавно были предложены два независимых подхода для определения энергии источника цунами: один основан на данных Deep-Ocean Assessment and Reporting of Tsunamis (DART) во время распространения цунами, а другой – на наземной прибрежной системе глобального позиционирования (GPS) при генерации цунами. Подход GPS учитывает динамический процесс землетрясения, подход инверсии DART обеспечивает фактическую оценку энергии цунами, распространяющихся волн цунами. Оба подхода приводят к согласованным энергетическим шкалам для изученных цунами. Исходя из этих многообещающих результатов, в работе [3] изучен подход к определению энергии источника цунами в реальном времени на основе объединения этих двух методов. На первой стадии определяется источник цунами по глобальной сети GPS сразу после землетрясения с целью раннего предупреждения в ближней зоне. Затем по ближайшим измерениям DART уточняется энергия цунами для повышения точности прогнозов или отмены тревоги. Комбинация этих двух сетей реального времени может предложить привлекательную возможность для раннего определения угрозы цунами с целью спасения большего числа жизней либо своевременной отмены предупреждений о цунами, чтобы избежать ненужных ложных тревог. За последнее десятилетие количество датчиков в открытом океане, способных анализировать информацию о проходящем цунами, неуклонно увеличивалось, особенно благодаря национальным кабельным сетям, а также международным усилиям, в частности системе DART. Полученная информация анализируется с целью предупреждения цунами. Большинство текущих предупреждений, которые включают оповещения о цунами, направлены на районы средней и дальней зоны. В работе [3] сформулированы основные направления выполнения исследований с использованием систем DART и GPS. Но сбой данной системы в Индийском океане, при котором было пропущено мощное цунами, вверг в уныние оптимистически настроенных ученых.

Необходимо отметить, что цунами могут быть вызваны не только землетрясениями, но и подводными оползнями, вулканической деятельностью, да и просто обрушением горных массивов в море [4].

Впервые при регистрации цунамигенного землетрясения была зафиксирована деформационная аномалия, которая на записи лазерного деформографа имела форму деформационного скачка, возникшего после начала землетрясения [5]. Далее этот результат был обобщен в работе [6], на основании чего заложены перспективы создания деформационного метода определения цунамигенности землетрясений. Перспективность данного метода связана с тем, что его развитие позволит, как мы предполагаем, на планетарных расстояниях дистанционно определять характер смещений отдельностей морской земной коры, приводящих в движение огромные массы воды, вырождающиеся при своем развитии в цунами. Ясно, что колебания, зарождающиеся в очаге землетрясения, не вызывают цунами. Данные колебания связаны с параметрами разрыва сплошности, т. е. с его геометрическими размерами и упругопластичными деформациями. Как правило, эти колебания лежат в диапазоне от первых минут до десятка секунд. Они никогда цунами не вызовут. Только быстрые перемещения огромных масс морской земной коры, которые, к сожалению, не регистрируются любыми широкополосными сейсмографами, приводят к генерации цунами.

В настоящей статье мы рассматриваем особенности появления деформационных аномалий, сопутствующих (сопровождающих) цунами, на нескольких примерах с описанием физических механизмов их возникновения и развития. Перспективность развития данного направления связана с тем, что скорости таких деформационных аномалий более чем на порядок больше скорости распространения цунами, что крайне важно для служб предупреждения.

1. Лазерный деформограф

Деформационная аномалия, описанная в работе [5] и больше соответствующая понятию «деформационный скачок», имела небольшую амплитуду, примерно 60 мкм, и была зафиксирована лазерным деформографом на расстоянии примерно 5600 км от места ее генерации. Понятно, что данная деформационная аномалия не может быть зарегистрирована любым широкополосным сейсмографом (велосиметром, акселерометром и т. п.), так как данные приборы неспособны реагировать на подобные возмущения. Можно было бы говорить о перспективности использования GPS-приемников для регистрации подобных аномалий, но на таких расстояниях от места возникновения деформационных аномалий это невозможно, поскольку основные образцы GPS-приемников могут обеспечить точность регистрации смещений около 1 мм, что значительно больше величины описанной аномалии.

В настоящее время для регистрации деформационных аномалий, связанных с процессом генерации цунами, лучше всего подходят лазерные деформографы, которые способны проводить измерения микросмещений земной коры в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц с высокой точностью (до 1 пм) [7]. В нашей работе мы будем пользоваться данными по вариациям микросмещений земной коры, полученными с помощью горизонтального лазерного деформографа, созданного на основе неравноплечего интерферометра Майкельсона с длиной измерительного плеча 52,5 м ориентацией север–юг. В нем в качестве источника света применяется частотно-стабилизированный гелий-неоновый лазер фирмы MellesGriott с долговременной стабильностью 10^{-9}. В последние годы проведена модернизация с установкой на деформографе частотно-стабилизированного лазера по линиям йода в одиннадцатом знаке и с усовершенствованной системой регистрации. После этой модернизации он способен регистрировать вариации микросмещений земной коры в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц с точностью 0,03 нм. Лазерный деформограф установлен в термоизолированных подземных помещениях на глубине около 3–5 м от поверхности земли в точке с координатами 42°34,798'N131°9,400'E, на высоте около 60 м над ур. м. На рис. 1 приведены общий вид подземной части центрального интерференционного узла (слева) и подземный лучевод (справа). Экспериментальные данные по кабельной линии передаются на регистрирующий компьютер, где после предварительной обработки формируются файлы данных с частотой дискретизации 1 кГц и длительностью 1 ч. Лазерный деформограф входит в состав сейсмоакустико-гидрофизического комплекса, который относится к ТОИ ДВО РАН и расположен на юге Приморского края России в прибрежной зоне Японского моря на мысе Шульца. Основное назначение комплекса связано с задачами изучения природы вариаций микродеформаций земной коры, колебаний давления атмосферы и гидросферы в широком частотном и динамическом диапазонах, исследования закономерностей возникновения, развития и трансформации колебаний и волн звукового и инфразвукового диапазонов. Измерения на комплексе проводятся в непрерывном режиме, а все полученные данные формируются в базу данных (объемом около 10 ТБ),

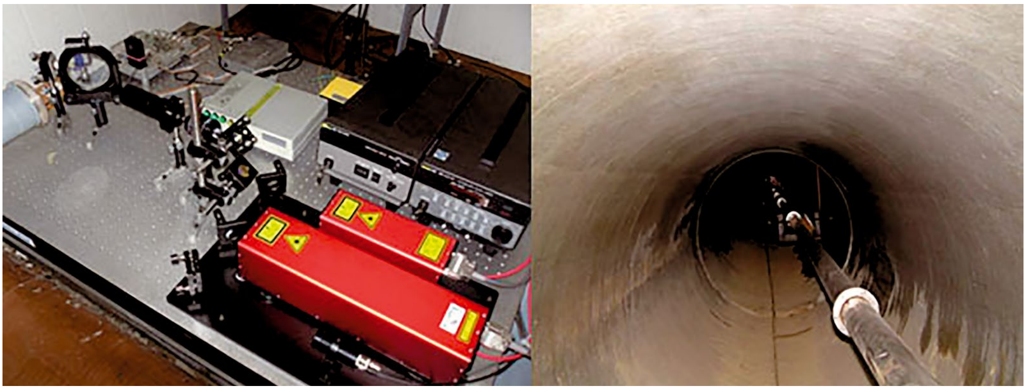


Рис. 1. Модернизированный 52,5-метровый лазерный деформограф. Центральный интерференционный узел с частотно-стабилизированным гелий-неоновым лазером по линиям йода (стабильность частоты 10^{-11}) (слева) и подземный лучевод (справа)

которая постоянно пополняется. Для синхронизации используются часы точного времени на основе применения GPS Trimble 5700.

2. Регистрация деформационных аномалий цунамигенных землетрясений

Лазерным деформографом, работающим с 2000 г., было зарегистрировано много подводных цунамигенных и нецунамигенных землетрясений. Основные характеристики (период и амплитуда) сейсмических волн, возникающих в очаге землетрясения, зависят от размеров разрыва в гипоцентре и от магнитуды – чем больше магнитуда землетрясения, тем больше первичные периоды волн и их амплитуды. Эти колебания и волны никогда не вызывают цунами. Цунами вызывают разнонаправленные поршневые движения дна, оползни и т. п., иногда сопутствующие землетрясениям. Чтобы понять, ждать ли цунами, надо зарегистрировать не само землетрясение, а эти подвижки. Высота цунами зависит от глубины моря. Если метровая подвижка произошла на глубине 5 м, то никакого цунами не возникнет. А вот если

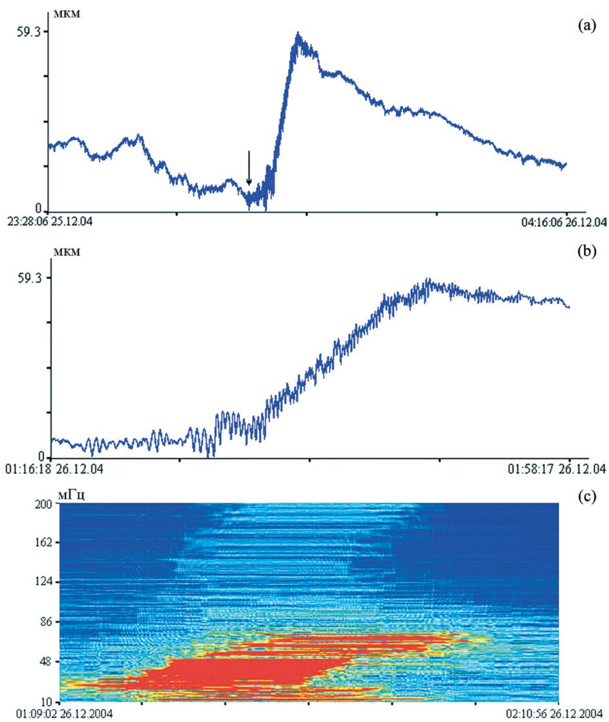


Рис. 2. Запись 52,5-метрового лазерного деформографа за декабрь 2004 г. (*a*), *b* – увеличенный фрагмент, *c* – динамическая спектрограмма. Стрелкой отмечено начало землетрясения. По оси абсцисс указано всемирное время

то же самое случилось на глубине 3 км, то при движении такой массы воды будет цунами огромной высоты!

Впервые одну из таких подвижек (скачок деформации) мы обнаружили в записи лазерного деформографа спустя почти два года после цунамигенного землетрясения 26 декабря 2004 г., эпицентр которого находился в точке с координатами 3,30? N95,87? E на расстоянии около 160 км к западу от Суматры на глубине 30 км от ур. м. Расстояние от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа составило примерно 5600 км. Запись лазерного деформографа с характерным сигналом от цунамигенного землетрясения приведена на рис. 2. На этой записи видна мощная деформационная аномалия, возникшая через небольшое время от начала землетрясения с амплитудой около 59,3 мкм. Амплитуда данной аномалии значительно больше амплитуды суточного прилива, наблюдаемого в месте расположения прибора. Сигнал цунамигенного землетрясения был зарегистрирован лазерным деформографом через 19 мин 54 с после начала землетрясения. При анализе динамической спектрограммы (рис. 2, c) установлено, что периоды основных колебаний, вызванных землетрясением, постепенно уменьшаются от 30 до 14 с. Зная соотношение, связывающее скорость распространения упругих волн с периодом колебаний, величину изменения периода основных колебаний и время, за которое это изменение произошло, можно определить расстояние до места землетрясения.

Анализ записей лазерного деформографа цунамигенного и нецунамигенного землетрясений показал, что регистрация деформационного скачка характерна только для цунамигенного землетрясения.

Далее рассмотрим некоторые особенности появления и развития деформационных аномалий в момент генерации цунами по четырем цунамиопасным регионам: Индонезия, Чили, западное побережье Северной Америки, Япония.

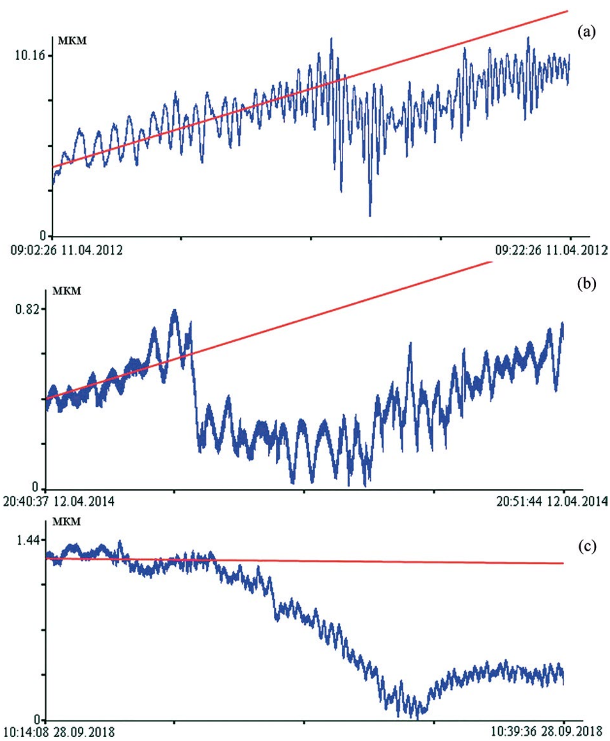


Рис. 3. Участки записей 52,5-метрового лазерного деформографа: *a* – апрель 2012 г., *b* – апрель 2014 г., *c* – сентябрь 2018 г.

2.1. Землетрясения в Индонезии

Первое рассматриваемое мощное землетрясение произошло 11.04.2012 г. в 08:38:36 на западном побережье северной Суматры (Индонезия) в точке с координатами 2,327°N, 93,063°E, на глубине 20 км с магнитудой 8,6. Максимально зарегистрированная высота волны цунами составила 1,08 м. Расстояние от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа более 5800 км. Сигнал этого землетрясения был зарегистрирован на записях лазерного деформографа почти через 18 мин в 08:55:39. Средняя скорость распространения упругой волны составила 5,66 км/с. На динамической спектрограмме выделяются колебания с периодами от 30 до 14 с, характерные для землетрясения.

Второе рассматриваемое землетрясение произошло 12.04.2014 г в 20:14:39 в точке с координатами 11,270°S, 162,148°E вблизи Соломоновых островов на глубине 22,6 км с магнитудой 7,6. В прибрежной зоне высота цунами достигла 0,5 м. Сигнал землетрясения на лазерном деформографе, установленном на расстоянии более 6700 км, был зарегистрирован почти через 20 мин в 20:33:58. Для этого землетрясения средняя скорость составила 5,58 км/с.

Следующее из рассмотренных землетрясений отмечено на о-ве Сулавеси 28.09.2018 г. в 10:02:45 с магнитудой 7,5 и с высотой волны цунами около 11 м. Эпицентр землетрясения находился в точке с координатами 0,256°S, 119,846°E на глубине 20 км, на расстоянии более 4800 км от места установки лазерного деформографа. Расчетная средняя скорость поверхностной упругой волны равна 5,49 км/с.

На рис. 3 представлены участки записей лазерного деформографа в момент регистрации трех землетрясений в Индонезии. На всех графиках присутствует деформационный скачок, характерный для цунамигенных землетрясений. Красным обозначена средняя линия направления записи лазерного деформографа при отсутствии скачка, но в момент землетрясения запись отклонилась от своего естественного поведения (наблюдается деформационная аномалия – скачок деформации), что и свидетельствует о цунамигенности землетрясения.

2.2. Землетрясения в Чили

На записях 52,5-метрового лазерного деформографа было выделено три сильных землетрясения, произошедших вблизи побережья Чили в период с 2010 по 2018 г. Первое случилось 27.02.2010 г. в 06:34:11 на северо-западном побережье Чили в точке с координатами 36,122°S, 72,898°W на глубине 22,9 км, максимальная высота катастрофического цунами была 29 м. Расстояние от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа более 17 800 км. На записи 52,5-метрового лазерного деформографа сигнал этого землетрясения был зарегистрирован в 07:19:00. Средняя скорость распространения упругой волны составила 6,77 км/с.

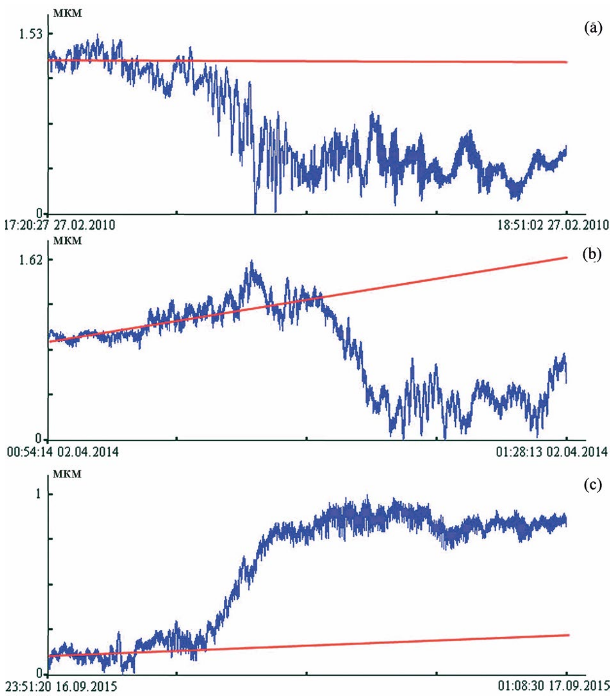


Рис. 4. Фрагменты записей 52,5-метрового лазерного деформографа: *a* – февраль 2010 г., *b* – апрель 2014 г., *c* – сентябрь 2015 г.

Следующие два сильных цунамигенных землетрясения состоялись в апреле 2014 г. и сентябре 2015 г. вблизи северо-западной части Чили. Сильное землетрясение произошло 01.04.2014 г. в 23:46:47 в точке с координатами 19,610°S, 70,769°W на глубине 25 км, высота волны цунами у берега достигла 4,6 м. Сигнал этого землетрясения был зарегистрирован лазерным деформографом, установленным на расстоянии более 16 700 км, 02.04.2014 г. в 00:24:10. 16.09.2015 г. в 22:54:32 разразилось сильное землетрясение, эпицентр которого находился в точке с координатами 31,573°S, 71,674°W на глубине 22,4 км. В результате этого землетрясения образовалось цунами высотой 13,6 м. На записи лазерного деформографа, расположенного на расстоянии около 17 650 км, сигнал был зарегистрирован в 23:45:01. Для этих землетрясений средняя скорость распространения упругой волны составляет 7,44 и 6,47 км/с соответственно.

При анализе записей лазерного деформографа в момент регистрации трех вышеописанных землетрясений были выявлены деформационные скачки (рис. 4, *а–с*). Красной линией на графиках обозначено среднее направление записи, а отклонение от этой линии в момент регистрации сейсмических волн и свидетельствует о цунамигенности землетрясения (наличие деформационной аномалии – скачка деформации).

2.3. Землетрясения на западном побережье Северной Америки

Первое из рассматриваемых мощных землетрясений произошло 28.10.2012 г. в 03:04:08 на юго-западном побережье Канады в точке с координатами 52,788°N, 132,101°W на глубине 14 км с магнитудой 7,8 и высотой цунами на шельфе 12,98 м. Расстояние от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа около 6800 км. Сигнал этого землетрясения был зарегистрирован на записях лазерного деформографа почти через 19 мин в 03:23:13. Для этого землетрясения средняя скорость распространения упругой волны составляет 5,94 км/с.

Второе цунамигенное землетрясение отмечено 05.01.2013 г. в 08:58:14 у берегов Аляски, США. Землетрясение с магнитудой 7,5 произошло в точке с координатами 55,228°N, 134,859°W на глубине 8,7 км, в результате чего образовалось цунами с максимальной высотой 1,5 м. Сигнал этого землетрясения на записях лазерного деформографа был выявлен 09:16:31. Лазерный деформограф расположен в 6500 км от эпицентра.

Еще одним из рассмотренных является землетрясение, произошедшее возле берегов Мексики 08.09.2017 г. в 04:49:19 с магнитудой 8,2. После него возникло цунами высотой 2,7 м. Эпицентр землетрясения находился в точке с координатами 15,022°N, 93,899°W на глубине 47,4 км, на расстоянии 12 150 км от места установки лазерного деформографа. При расчете средней скорости распространения упругих волн для землетрясения 2013 г. она оказалась 5,92 км/с, а для землетрясения 2017 г. – 5,48 км/с.

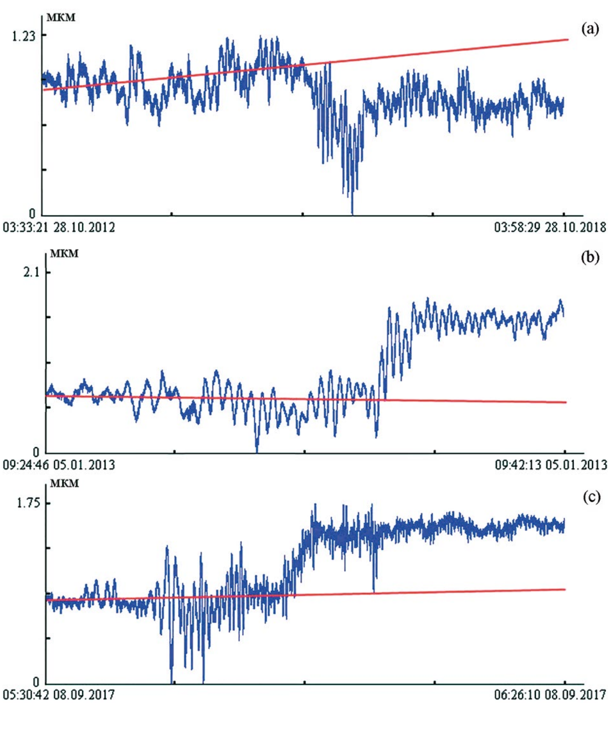


Рис. 5. Фрагменты записей 52,5-метрового лазерного деформографа: *а* – октябрь 2012 г., *b* – январь 2013 г., *c* – сентябрь 2017 г.

На рис. 5, *а–с* представлены фрагменты записей лазерного деформографа в момент регистрации трех землетрясений, происшедших на западном побережье Северной Америки. На всех графиках присутствует деформационный скачок, характерный для цунамигенных землетрясений, красным обозначена средняя линия направления записи лазерного деформографа при отсутствии скачка, но в момент землетрясения запись отклонилась от своего естественного поведения, что и свидетельствует о цунамигенности землетрясения.

2.4. Японский регион

Первое из рассматриваемых землетрясений произошло в 16:25:06 (UTC) 15 апреля 2016 г. в 6 км от г. Кумамото в точке с координатами 32,791°N, 130,754°E. Магнитуда землетрясения составила 7, а его эпицентр располагался на глубине 10 км [8]. На рис. 6, а приведен фрагмент записи неравноплечего лазерного деформографа в момент регистрации цунамигенного землетрясения. Из графика видно, что через несколько секунд после начала землетрясения была зарегистрирована деформационная аномалия, отклонение от тренда. В данном случае деформационный скачок составил 8,4 мкм.

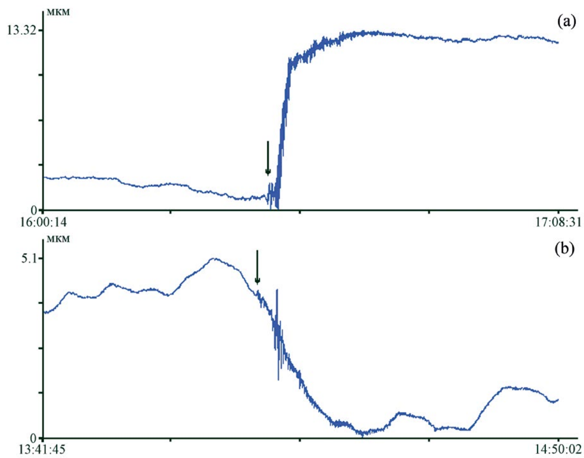


Рис. 6. Фрагмент записи 52,5-метрового лазерного деформографа: *a* – 15 апреля 2016 г., *b* – 13 февраля 2021 г.

Следующее землетрясение, которое по деформационному методу можно отнести к цунамигенному, произошло в 14:07:49 (UTC) 13 февраля 2021 г. в 73 км от пос. Намие. В точке с координатами 37,727°N, 141,775°E. Магнитуда этого землетрясения составила 7,1, а глубина эпицентра 44 км (https://www.volcanodiscovery.com/ru/zemletryaseniya/news.html). Это землетрясение было зарегистрировано лазерным деформографом, фрагмент записи которого приведен на рис. 6, b. В этом случае зарегистрированная деформационная аномалия составила 4,1 мкм.

3. Анализ полученных результатов

Величину деформационной аномалии в месте регистрации будем брать из экспериментальных данных лазерного деформографа, а расчетную величину смещения морского дна – на сайте американской геофизической службы (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/), так как приборов, способных зарегистрировать это смещение на дне, нет. В расчете смещений дна используется кинематический подход, основанный на методе Ji [9]. В этом методе для расчета применяются как поверхностные волны Рэлея и Лява, так и поверхностные волны P и S.

Рассчитаем степень расходимости для каждого из рассматриваемых цунамигенных землетрясений, используя экспериментальные и модельные данные. Под степенью расходимости понимается степень α при расстоянии в формуле:

$$A = A_0 \frac{1(\text{м})}{R^{\alpha}(\text{м})},$$

где A – величина смещения, зарегистрированная лазерным деформографом; A_0 – величина расчетного смещения в эпицентре землетрясения; R – расстояние от места генерации землетрясения до лазерного деформографа; α – степень.

Полученные и модельные результаты приведены в таблице.

Расчетные смещения геоблоков (частей геоблоков и т.п.) и величины деформационных аномалий, зарегистрированных лазерным деформографом

Дата	Расчетное смещение, м	Смещение на деформографе, мкм	Расстояние, км	Степень расходимости
11.04.2012	5,4	2	5800	0,951
12.04.2014	0,8	0,4	6700	0,923
28.09.2018	1,8	1	4800	0,936
27.02.2010	10,5	1,11	17 800	0,962
01.04.2014	8	1	16 700	0,956
16.09.2015	3,2	0,6	17 650	0,928
28.10.2012	1,5	0,4	6800	0,962
05.01.2013	3	0,8	6500	0,965
08.09.2017	4	0,5	12 150	0,974
15.04.2016	4	8,4	1081	0,941
13.02.2021	1,9	4,1	893	0,952

С учетом всех аномалий усредненная расходимость равна 0,950. Максимальное отклонение от средней величины составляет 0,024, т.е. 2,5%. Для всех рассмотренных случаев расходимость близка к сферической, но не сферическая. Это связано с соотношением величины смещения и толщины земной коры, по которой распространяется сигнал от места генерации до места приема: амплитуда сигнала значительно меньше толщины земной коры на пути его распространения. Величины степени расходимости для всех случаев с учетом небольших ошибок практически совпадают. Это свидетельствует только об одном – очень хорошем совпадении модельных и экспериментальных значений смещений. То есть для всех рассмотренных экспериментальных случаев можно с большой уверенностью утверждать, что зарегистрированные аномальные сигналы связаны со смещениями участков земной коры, приведшими к образованию цунами. В дальнейшем по данным лазерных деформографов можно оценивать величины смещений в очаге образования цунами с учетом полученной степени расходимости и расстояния до места возникновения землетрясений.

Заключение

В процессе обработки экспериментальных данных лазерного деформографа установлено, что для всех цунамигенных землетрясений характерным является наличие в записях приборов деформационных аномалий – скачков деформаций. Эти аномалии, приводящие к образованию цунами в окрестности очаговой области землетрясений, возникают в процессе относительного движения геоблоков (плит, отдельностей) и подводных оползней. Такие движения могут быть описаны уравнением синус-Гордона, однокинковые и двухкинковые решения которых объясняют появление наблюдаемых деформационных аномалий на записях лазерных деформографов. Поведение деформационных аномалий характерно для поведения солитонов в нелинейной среде. Учитывая то, что сигнал от цунамигенных землетрясений, содержащих деформационную аномалию, распространяется со скоростями, значительно превышающими скорости для поверхностных волн (от 5,48 до 7,44 км/с), можно предположить, что сигнал распространяется в основном не по поверхности Земли и по закону, находящемуся в пределах от цилиндрической до сферической расходимостей.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на экспериментальное изучение пространственного поведения деформационных аномалий цунамигенных землетрясений. Для этого необходимо расположить несколько лазерных деформографов далеко друг от друга по предполагаемому направлению движения деформационных аномалий – деформационных скачков – кинков – антикинков – бризеров. Данные экспериментальные исследования позволят изучить все основные параметры наблюдаемых возмущений. Особый интерес вызывает задача по изучению сохранения формы солитона при его уменьшающейся величине вследствие расходимости в пространстве при движении. Развитие данного направления исследований, наряду с применением классического «магнитудно-географического принципа» определения цунамиопасности подводных землетрясений, позволит приблизить нас к краткосрочному прогнозу цунами.

С учетом вышесказанного при сферической расходимости в соответствии с таблицей можно рассчитать условия применимости для расчетных смещений GPS-приемников, способных регистрировать смещение с точностью 1 мм. Так, при среднем смещении в 4,2 м GPS-приемник сможет зафиксировать смещение величиной 2 мм на расстоянии 2100 м при условии сферической расходимости. Понятно, что ни о каких перспективах применения GPS-приемников для регистрации смещений геоблоков (плит, отдельностей), приводящих к образованию цунами, говорить не приходится. Цилиндрическая расходимость сигнала не спасает ситуации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Stein S., Okal E. A. Speed and size of the Sumatra earthquake // Nature. 2005. Vol. 434. N7033. P. 581–582.
2. Wei Y., Newman A. V., Hayes G. P., Titov V. V., Tang L. Tsunami forecast by joint inversion of real-time tsunami waveforms and seismic or GPS Data: Application to the Tohoku 2011 tsunami // Pure Appl. Geophys. 2014. Vol. 171. P. 3281–3305. https://doi.org/10.1007/s00024–014–0777-z.
3. Pacific Tsunami Warning Center/International Tsunami Information Center (PTWC/ITIC). User's guide for the Pacific Tsunami Warning Center enhanced products for the Pacific tsunami warning system. Revised Edition. Paris, France: UNESCO/IOC, 2014. Vol. 105. (IOC Technical Series).
4. Perez del Postigo Prieto N., Raby A., Whittaker C., Boulton S. J. Parametric Study of Tsunamis Generated by Earthquakes and Landslides // J. Mar. Sci. Eng. 2019. Vol. 7 (5). P. 154.
5. Долгих Г. И., Долгих С. Г., Ковалев С. Н., Корень И. А., Овчаренко В. В., Чупин В. А., Швец В. А., Яковенко С. В. Регистрация деформационной аномалии цунамигенного землетрясения лазерным деформографом // Докл. АН. 2007. Т. 412, № 1. С. 104–106.
6. Долгих Г. И., Долгих С. Г., Ковалев С. Н., Овчаренко В. В., Чупин В. А., Швец В. А., Яковенко С. В. Деформационный метод определения цунамигенности землетрясений // Докл. АН. 2007. Т. 417, № 1. С. 109–112.
7. Долгих Г. И. Принципы построения однокоординатных лазерных деформографов // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, вып. 5. С. 24–30.
8. Hashimoto M., Savage M., Nishimura T., Horikawa H., Tsutsumi H. 2016 Kumamoto earthquake sequence and its impact on earthquake science and hazard assessment // Earth, Planets and Space. 2017. Vol. 69. P. 98. DOI: 10.1186/s40623–017–0682–7.
9. Ji C., Wald D. J., Helmberger D. V. Source description of the 1999 Hector Mine, California earthquake. Part I: Wavelet domain inversion theory and resolution analysis // Bull. Seism. Soc. Am. 2002. Vol. 92, N4. P. 1192–1207.

REFERENCES

1. Stein S., Okal E.A. Speed and size of the Sumatra earthquake. *Nature.* 2005;434(7033);581–582.

2. Wei Y., Newman A.V., Hayes G.P., Titov V.V., Tang L. Tsunami forecast by joint inversion of real-time tsunami waveforms and seismic or GPS Data: Application to the Tohoku 2011 tsunami. *Pure and Applied Geophysics.* 2014;171:3281–3305. https://doi.org/10.1007/s00024–014–0777-z.

3. Pacific Tsunami Warning Center/International Tsunami Information Center (PTWC/ITIC). User's guide for the Pacific Tsunami Warning Center enhanced products for the Pacific tsunami warning system. Revised Edition. Paris, France: UNESCO/IOC; 2014. Vol. 105. (IOC Technical Series).

4. Perez del Postigo Prieto N., Raby A., Whittaker C., Boulton S.J. Parametric Study of Tsunamis Generated by Earthquakes and Landslides. *Journal of Marine Science and Engineering.* 2019;7(5):154.

5. Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kovalev, S.N., Koren I.A., Ovcharenko V.V., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Recording of deformation anomaly of a tsunamigenous earthquake using a laser strainmeter. *Doklady Earth Sciences.* 2007;412(1):74–76.

6. Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Ovcharenko V.V., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. A deformation method for determining the tsunami potential of earthquakes. *Doklady Earth Sciences.* 2007;417(1):1261–1264.

7. Dolgikh G.I. Principles of designing single-coordinate laser strainmeters. *Technical Physics Letters.* 2011;37(3):204–206.

8. Hashimoto M., Savage M., Nishimura T., Horikawa H., Tsutsumi H. 2016 Kumamoto earthquake sequence and its impact on earthquake science and hazard assessment. *Earth, Planets and Space.* 2017;69:98. DOI: 10.1186/s40623–017–0682–7.

9. Ji C., Wald D.J., Helmberger D.V. Source description of the 1999 Hector Mine, California earthquake. Part I: Wavelet domain inversion theory and resolution analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America.* 2002;92(4):1192–1207.

Научная статья
УДК 550.34.06.013.3+550.34.03
DOI: 10.31857/S0869769824020025
EDN: ldwgvs

Пространственные неоднородности вектора подвижки протяженных очагов землетрясений в районе Курило-Камчатского сегмента Тихоокеанской зоны субдукции

А.В. Коноваловов, Э.Е. Воронежцева, Ю.А. Степнова✉

Алексей Валерьевич Коновалов
кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия
a.konovalov@geophystech.ru
http://orcid.org/0000-0003-2997-1524

Эвелина Евгеньевна Воронежцева
студентка
Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия
evorone@mail.ru

Юлия Андреевна Степнова
кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
stepnova@fegi.ru
http://orcid.org/0000-0001-5263-5161

Аннотация. Исследование ориентировано на уточнение фрагментированной структуры очага землетрясения в области межплитового взаимодействия Тихоокеанской и Северо-Американской литосферных плит (Курило-Камчатский сегмент). Под фрагментированной структурой очага понимаются размеры, положение и количество неровностей на площадке разрыва. Неровности, отождествляемые с относительно повышенными значениями вектора подвижки, являются источником высокочастотного некогерентного излучения. Полученные результаты востребованы в практических задачах по моделированию акселерограмм в рамках «рецепта», предложенного японскими исследователями K. Irikura, H. Miyake. Для решения поставленных задач разработана программа, анализирующая геопространственные данные, приводимые сейсмологическими дата-центрами. Проанализированы неоднородности распределения вектора подвижки на плоскости разрыва. На основе обработанных данных и обзора параметров субдукционных землетрясений предложена фрагментированная модель очага в исследуемом районе. Случайный перебор в приемлемых диапазонах параметров модели позволит получить набор сценарных землетрясений. В настоящей статье обосновываются указанные диапазоны.

Ключевые слова: протяженный сейсмический источник, землетрясение, asperity, субдукция

Для цитирования: Коновалов А.В., Воронежцева Э.Е., Степнова Ю.А. Пространственные неоднородности вектора подвижки протяженных очагов землетрясений в районе Курило-Камчатского сегмента Тихоокеанской зоны субдукции // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 2. С. 17–35. http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020025, EDN: ldwgvs

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00620 (https://rscf.ru/project/22-27-00620/).

Original article

Spatial heterogenity of slip on finite faults in the Kuril-Kamchatka Segment of the Pacific subduction zone

A.V. Konovalov, E.E. Voronezhtseva, Yu.A. Stepnova

Alexey V. Konovalov
Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Leading Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
a.konovalov@geophystech.ru
http://orcid.org/0000-0003-2997-1524

Evelina E. Voronezhtseva
Student
Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
evorone@mail.ru

Yulia A. Stepnova
Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Senior Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
stepnova@fegi.ru
http://orcid.org/0000-0001-5263-5161

Abstract. The study aims at gathering detailed information on source-related seismic radiation patterns in the interaction zone of Pacific and North American lithospheric plates (the Kuril-Kamchatka segment). To achieve our goals we have developed a program capable of mapping zones of relatively high slip and assessing their area based on GIS data. We have analyzed the asperity distribution on a fault planes. A stochastic model of subduction-related interplate earthquakes has been proposed in the framework of fragmentary-based source model. The obtained results can further be used in a stochastic simulation of a catalogue of finite faults for the Japan-Kuril-Kamchatka island arc.

Keywords: finite fault model, earthquake, asperity, subduction

For citation: Konovalov A.V., Voronezhtseva E.E., Stepnova Yu.A. Spatial heterogenity of slip on finite faults in the Kuril-Kamchatka Segment of the Pacific subduction zone. *Vestnik of the FEB RAS.* 2024;(2):17–35. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020025, EDN: ldwgvs

Funding. This work was supported by grant from the Russian Science Foundation № 22-27-00620 (https://rscf.ru/project/22-27-00620/).

Введение

В большинстве случаев в качестве модели подвижки в очаге тектонического землетрясения рассматривается плоскость, вдоль которой происходит перемещение блоков пород. Под механизмом очага землетрясения понимают ориентацию этой плоскости и направление подвижки вдоль нее в географической системе координат (рис. 1). Однако сам вектор подвижки принимается постоянным вдоль всего разрыва.

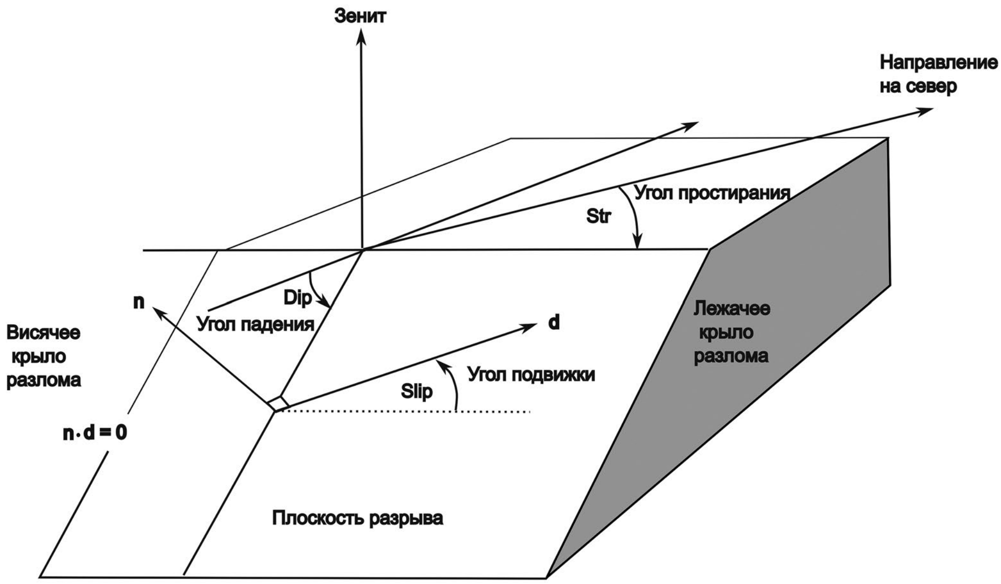


Рис. 1. Геометрия плоскости сейсмического разрыва

Использование упрощенной дислокационной модели очага землетрясения, в которой величина подвижки равномерно распределена по площадке разрыва, приводит к консервативным оценкам природной опасности землетрясений и цунами [1]. Это связано с тем, что относительно небольшие зоны (asperity), характеризуемые повышенными значениями параметра прочности, существенно влияют на волновую картину в ближней зоне [2].

Сбалансированные оценки сейсмической опасности и опасности цунами можно получить путем стохастической симуляции вектора подвижки на площадке разрыва и положения нодальной плоскости в пространстве [3, 4] и последующего синтеза сейсмической записи или смещения поверхности дна для каждой случайной реализации протяженного источника [5–7]. Такие оценки носят вероятностный характер и широко используются в прикладных задачах [8, 9 и др.].

Один из способов задания протяженного источника с неоднородным распределением вектора подвижки – это использование фрагментированной структуры очага. Под фрагментированной структурой очага понимаются размеры, положение и количество неровностей на площадке разрыва. В рамках феноменологии, развитой Ирикурой [10], такие неровности отождествляются с относительно повышенными значениями вектора подвижки. Последние являются источниками высокочастотного некогерентного излучения. В большинстве случаев высокочастотная энергия предпочтительно излучается из периферии больших пятен высокой подвижки (неровностей), но не связана с максимумами или центрами этих пятен (см., например, [11, 12]).

Для моделирования случайных неоднородностей чаще всего используется метод генерации спектра волнового числа [5]:

$$P(k) = \frac{A_z \times A_x}{\left(1 + k^2\right)^{H+1}}, \tag{1}$$

где

$$k = \left(A_z^2 \times k_z^2 + A_x^2 \times k_x^2\right)^{0,5}, \tag{2}$$

$P(k)$ – автокорреляционная функция фон Кармана, k_z и k_x – соответственно волновые числа вдоль падения (ось z) и простирания (ось x) плоскости разрыва, A_z и A_x – соответственно размеры пространственной неоднородности (иногда эти параметры обозначают как корреляционные размеры) вдоль этих направлений, H – характеристика затухания автокорреляционной функции, имеющая физический смысл фрактального размера D:

$$D = 3 - H \text{ (в случае двухмерного пространства).} \tag{3}$$

Параметры A_z, A_x и H обычно оцениваются исходя из спектральной подгонки теоретических и наблюдаемых записей [4, 13]. Как только неизвестные параметры определены, обратное двухмерное преобразование Фурье выражения (1) после нормализации дает искомое распределение вектора подвижки (с учетом фазового спектра, который описывается равномерным случайным распределением аргумента в пределах от 0 до 2). Количество симуляций зависит от поставленной задачи. При каждой симуляции проверяется соответствие характера распределения вектора подвижки сценарным моделям. Поэтому поиск таких сценариев является актуальной задачей.

На сегодняшний момент мы не располагаем записями сильных землетрясений в ближней зоне исследуемого района, поэтому единственная возможность корректной оценки пространственных параметров A_z и A_x – это комплексное сейсмологическое исследование целевого региона на основании имеющихся данных о распределении вектора подвижки на площадках разрыва. В качестве начального приближения параметр D из (3) можно принять равным 2,29, что обосновывается в [4]. В [14] авторы предлагают использовать в качестве опорного значения фрактального размера $D = 2{,}5$.

Существуют также и другие подходы моделирования, в рамках которых задается детерминистическая фрагментированная модель протяженного источника (с пятнами на разрыве), которая подвергается наложению «шума» – случайной компоненты смещения в каждом сегменте (например, [15]). Здесь также чаще всего применяется спектральный метод симуляции случайных неоднородностей подвижки.

Таким образом, в рамках фрагментированной модели очага землетрясения необходимо знать, какую удельную площадь занимает пятно на разрыве с относительно повышенными значениями подвижки, а также количество таких пятен на плоскости. Кроме того, необходимо учитывать геометрические характеристики площадки разрыва (углы падения, простирания и подвижки, отношения длины разрыва к ширине).

А. А. Гусев на основе физических представлений оценил удельную площадь неровностей, которая составила 0,1–0,3 отн. ед. [16], что позднее подтвердилось экспериментальными работами.

Цель настоящего исследования – уточнение фрагментированной модели сейсмических источников в зоне межплитового взаимодействия Тихоокеанской и Северо-Американской литосферных плит (Курило-Камчатский сегмент), что в дальнейшем позволит получить более детальную информацию об излучательных характеристиках очага землетрясения в зоне субдукции. Задача исследования – первая оценка характера распределения вектора подвижки на плоскости разрыва.

Для решения поставленных задач произведена автоматизация вычислений на основе современных программ и программного кода. Разработана программа для поиска зон с относительно повышенной подвижкой и оценки их площадей на основе геопространственных данных, публикуемых сейсмологическими дата-центрами. Это позволило проанализировать характеристики протяженных очагов землетрясений, произошедших в районе Курило-Камчатской дуги, и представить обобщенную фрагментированную модель землетрясения.

Исходные данные

Для анализа крупных межплитовых землетрясений в районе Курило-Камчатской островной дуги использовался сейсмологический сервис USGS, предоставляющий детальную информацию о землетрясениях по всему миру в оперативном режиме [17]. Существует также база данных Scrmod-rc [18], в которой представлена компиляция многих наблюденных результатов инверсии поля подвижки в очаге. В основном данный сайт использует результаты расчетов, опубликованные в научных статьях. Порой на одно землетрясение приходится несколько альтернативных решений. Это, безусловно, положительный момент. Однако для района исследований опубликованных данных оказалось не так много, поэтому мы использовали ресурс USGS [17].

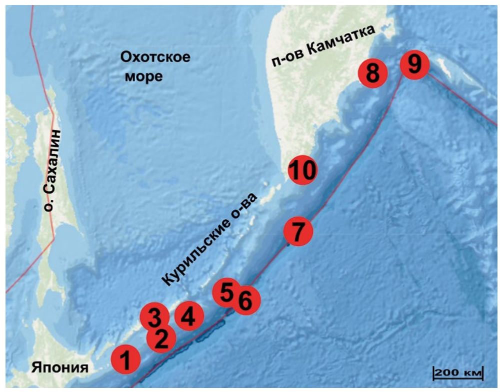


Рис. 2. Землетрясения в районе Курило-Камчатской островной дуги с магнитудой $M \geq 7{,}0$ (*1–10*), для которых доступны данные о распределении вектора подвижки на разрыве (finite fault) [17]

Среди поисковых параметров землетрясений на ресурсе USGS использовались:

1) магнитуда – $M \geq 7{,}0$;

2) временной период – 1879–2022 гг.;

3) выходные данные – FFT (finite fault).

С данными, соответствующими запросу, найдено 215 землетрясений по всему миру. Для рассматриваемой территории были отобраны землетрясения с глубиной очага от 0 до 200 км. Финальная выборка насчитывает 10 землетрясений (рис. 2).

На рис. 3 показан пример распределения вектора подвижки – его амплитуда. Гипоцентр землетрясения (точка начала вспарывания) обозначен звездочкой. Пятна, закрашенные более темными цветами на плоскости разрыва, относятся к областям с относительно высоким значением подвижки. Такие области на разрыве ассоциируются с зонами повышенной прочности. Стрелочки показывают направление подвижки отдельного сегмента разлома, а длина вектора соответствует величине локального смещения.

Одно крупное пятно располагается в верхней части плоскости разрыва, что видно из рис. 3. С такими пятнами связаны как величина косейсмических смещений (поднятие/опускание, горизонтальные подвижки поверхности Земли), так и интенсивность сейсмических колебаний. На глаз оценить долю занимаемой пятном площади проблематично, поэтому такие оценки можно сделать, используя программные методы.

Отношение двух значений, площади области с повышенной прочностью и площади всего разрыва, даст возможность более точно описывать фрагментированную

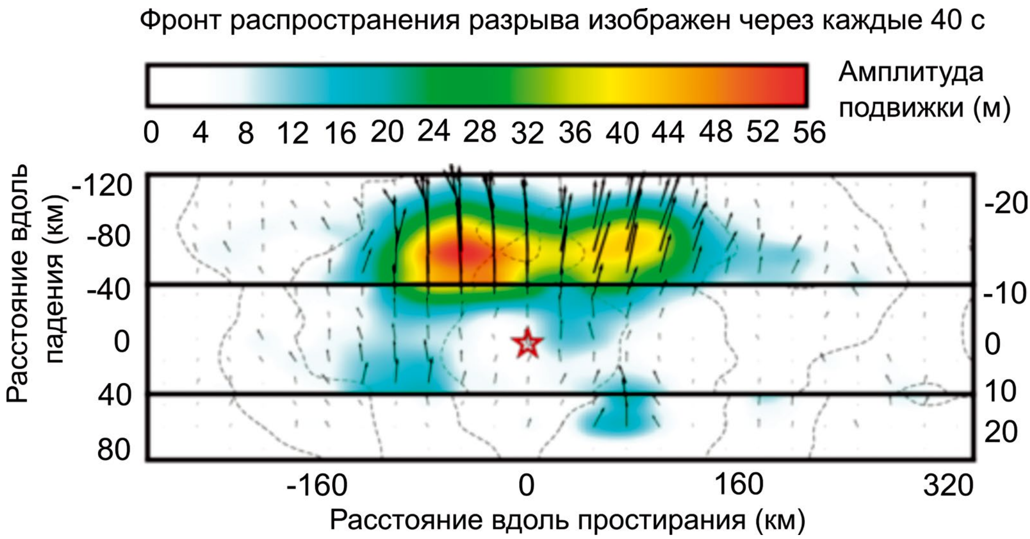


Рис. 3. Распределение вектора подвижки на плоскости разрыва 11 марта 2011 г. в 5:46 в Тохоку (Япония). Эпицентр землетрясения располагался в точке с координатами 38,297° с. ш., 142,373° в. д. Моментная магнитуда составила Mw 9,1, угол простирания (Str) – 198,0°, угол падения (Dip) – 15,0° [19]

структуру очага землетрясения в районе субдукции. Подробнее этот вопрос рассмотрен ниже, в разд. «Методы и подходы».

В табл. 1 приведены исходные землетрясения, которые анализировались в настоящей работе.

Таблица 1

Параметры рассматриваемых землетрясений

№ п/п	Дата и время (ч:мин) в очаге	Магнитуда, Mw	Эпицентр		Глубина гипоцентра, км	Угол падения, град	Угол простирания, град	Тектонический тип
			φ° с. ш.	λ° в. д.				
1	4.10.1994 13:22	8,3	43,773	147,321	14	41	158	A
2	3.12.1995 18:01	7,9	44,663	149,300	33	12	227	B
3	13.02.2020 10:33	7,0	45,616	148,959	143	81	239	A
4	22.12.1991 8:43	7,6	45,533	151,021	24,7	19	226	B
5	15.11.2006 11:14	8,3	46,592	153,266	10	16	220	B
6	13.01.2007 4:23	8,1	46,243	154,524	10	39	220	A
7	25.03.2020 2:49	7,5	48,964	157,696	57,8	43	29	A
8	5.12.1997 11:26	7,8	54,841	162,035	33	23	202	B
9	20.12.2018 17:01	7,3	55,100	164,699	16,6	52	338	B
10	8.06.1993 13:03	7,5	51,218	157,829	70,6	29	211	B

Примечание. A – внутриплитовые, B – межплитовые. Источник данных – NEIC USGS (National Earthquake Information Center, United States Geological Survey – Национальный информационный центр о землетрясениях, Геологическая служба США).

Мы проанализировали пространственное положение плоскостей разрыва и разделили события на межплитовые (произошедшие на контакте двух плит) и внутриплитовые. Для этого построена схематическая модель взаимодействия плит в зоне субдукции (рис. 4) согласно [20]. На этот же рисунок нанесены плоскости,

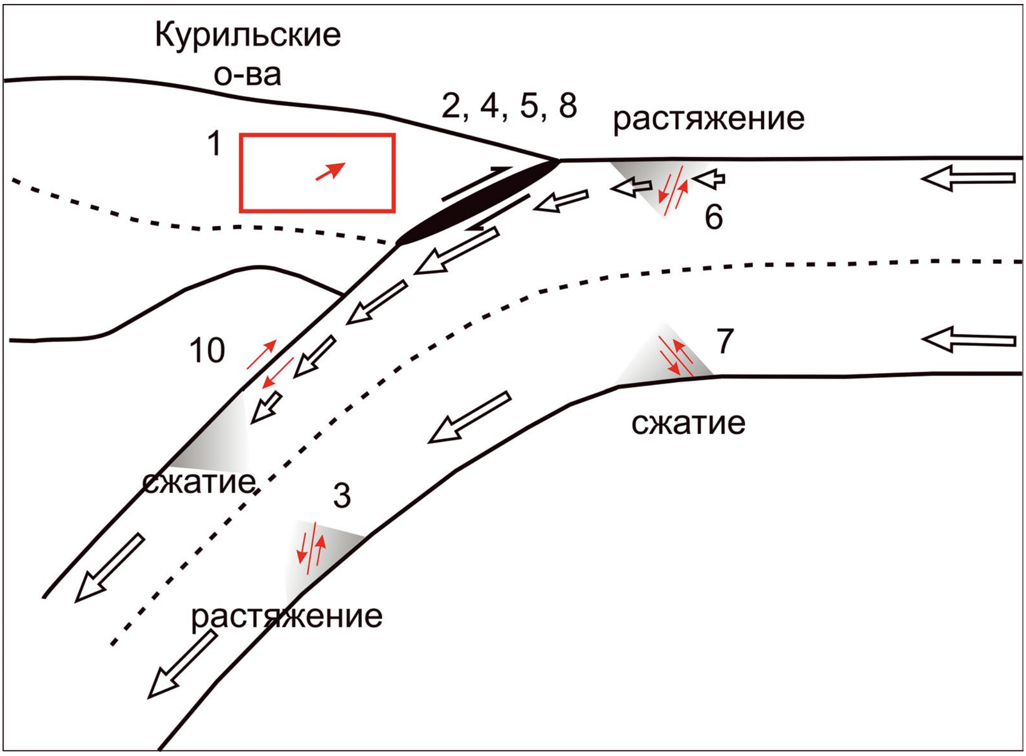


Рис. 4. Модель субдукции и сейсмотектонического процесса для Курильской островной дуги. Номер землетрясения на рисунке соответствует порядковому номеру, приведенному в табл. 1

по которым происходило вспарывание разрывов, и соответствующие им механизмы очага. Основная часть рассматриваемых межплитовых событий расположена между дугой и глубоководным желобом, данные события характеризуются взбросами и надвигами, что является следствием упругой отдачи от подвига Тихоокеанской литосферной плиты под Северо-Американскую или Охотоморскую микроплиту.

Из 10 рассматриваемых землетрясений (рис. 4) четыре (№ 2, 4, 5, 8) являются межплитовыми, т. е. произошли в зоне контакта двух тектонических плит. Землетрясение под № 10 также является межплитовым, но более глубоким, в то время как межплитовое событие № 9 относится к Камчатско-Алеутской островной дуге (данные события не учитываются в построении обобщенной модели межплитового землетрясения), поэтому оно не приведено на рис. 4. Остальные землетрясения можно отнести к внутриплитовому типу. Известно, что межплитовые землетрясения происходят чаще, чем внутриплитовые, однако землетрясения, возникающие внутри плиты, характеризуются повышенным сброшенным напряжением и, как следствие, – относительно более высокими параметрами сейсмических воздействий [21].

Методы и подходы

Для автоматизации расчетов был разработан код на языке Python 3.10 с помощью приложения Jupyter. Подключаемые библиотеки: Numpy, Matplotlib. В разработанной программе были получены значения подвижек каждого землетрясения с их координатами в двухмерном пространстве, рассчитано среднее значение подвижек и размечены области, отождествляемые с зонами повышенной прочности [12].

В разных статьях предлагаются различные количественные показатели для отождествления сегментов разрыва с зонами повышенной прочности. Так, в [22] предлагается ассоциировать с такими зонами те участки, в которых локальное смещение в 1,5 раза превышает значение подвижки, усредненное по всему разрыву. В [10] данный множитель зависит от количества зон повышенной прочности (другими словами, пятен на плоскости разрыва). Для одного пятна предлагается использовать коэффициент 1,8, для двух – 2, для трех и более – 2,3. В [3] используется множитель 2. В [5] такой коэффициент принят равным 3, однако в данной статье рассматривается мегаземлетрясение 11.03.2011 г. в Японии (Mw 9,1), характеризуемое пятью пятнами.

В настоящей работе используется в некотором смысле «средний» подход, в рамках которого мы ассоциируем сегменты подвижки с зонами повышенной прочности, если локальное значение подвижки в рассматриваемом сегменте в 2 раза больше среднего значения по очагу.

Разработка программы и вычисления включали несколько этапов:

- Получение значений подвижек и их координат с информационного ресурса USGS в формате geojson. Значения подвижки приведены для каждого сегмента разрыва. Размер сегмента варьируется в зависимости от магнитуды землетрясения.
- Вычисление среднего значения подвижки и определение сегментов разрыва, ассоциирующихся с зонами высокой подвижки. Изображение зон повышенной прочности.
- Вычисление отношения Sa/S, где Sa – площадь связной области, в которой локальное значение подвижки в 2 и более раза больше усредненной подвижки по всему очагу, S – площадь всего разрыва. Область является связанной, если она отождествляется с не менее чем тремя соседними сегментами высокой подвижки. В противном случае область (один или два соседних сегмента) принято считать случайным выбросом.
- Расчет количества связных областей (пятен на разрыве).
- Оценка среднего угла подвижки Slip_a. Параметр Slip_a рассчитан только для связных зон с повышенным значением подвижки.

Результаты и обсуждение

С помощью изображений, полученных вследствие программной обработки данных (рис. 5), было рассчитано количество связанных зон внутри целого разрыва. В результате вычислений выявлены характеристики каждого разрыва (табл. 2).

В результате получено среднее (по всем землетрясениям) значение отношения площади связанных зон с относительно повышенным значением подвижки к площади всего разрыва (параметр Sa/S). Данное значение составило 0,17 ± 0,01. Для межплитовых землетрясений средний параметр Sa/S немного больше и составляет 0,18 ± 0,01. Среднее (по всем землетрясениям) количество пятен (связных областей, в которых вектор подвижки в 2 и более раза выше среднего по всему очагу) составляет 2 ± 1. Для межплитовых землетрясений количество пятен также варьируется от одного до трех. Среднее значение угла простирания для межплитовых землетрясений составляет 217,2° ± 9,5°, угла падения – 19,8° ± 5,84°, угла подвижки – 95,6° ± 10,95°.

Таким образом, по имеющимся данным, отношение площади зоны повышенной прочности ко всей площадке разрыва в среднем составляет около 0,17, что немного отличается от аналогичных оценок в других регионах и для разных тектонических

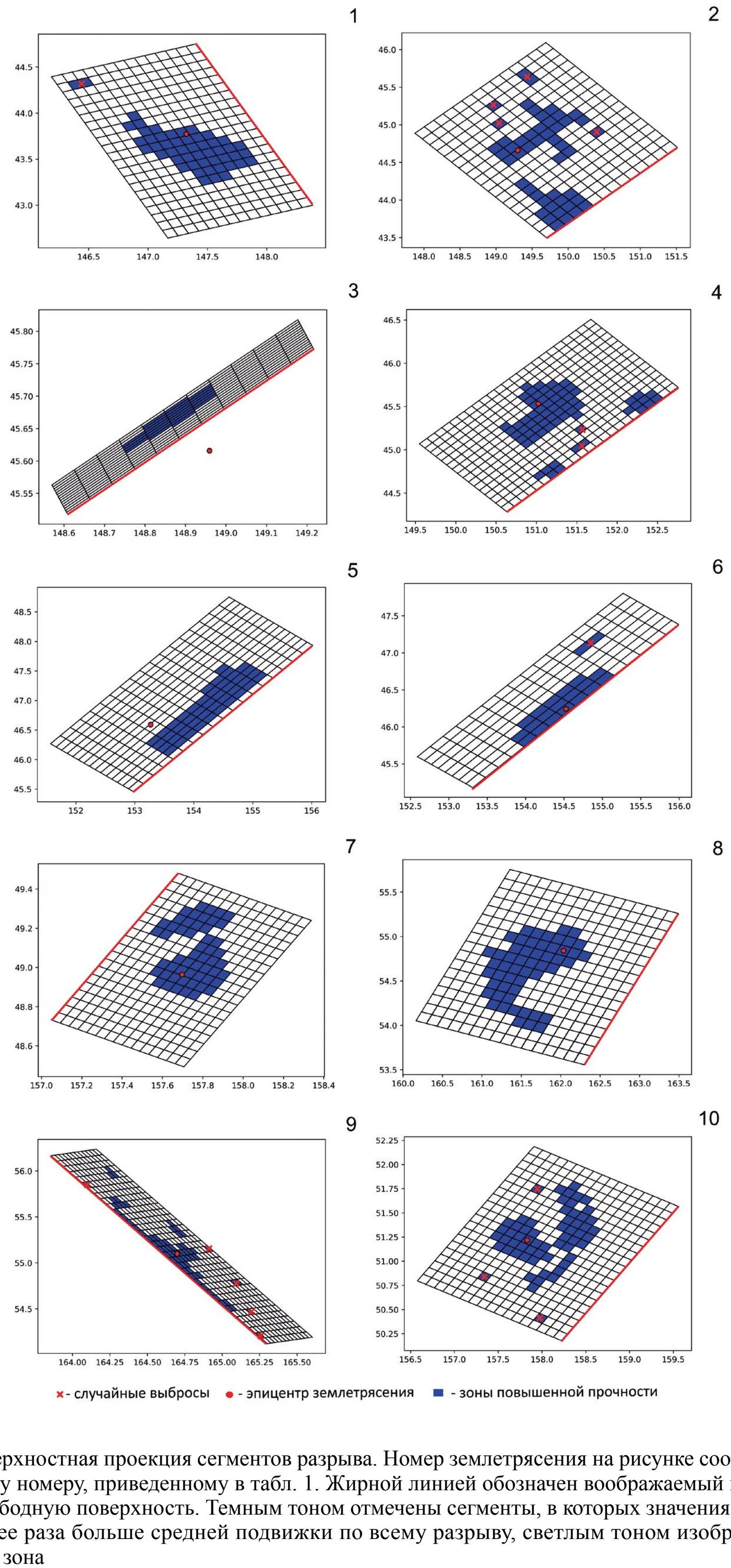


Рис. 5. Поверхностная проекция сегментов разрыва. Номер землетрясения на рисунке соответствует порядковому номеру, приведенному в табл. 1. Жирной линией обозначен воображаемый выход разрыва на свободную поверхность. Темным тоном отмечены сегменты, в которых значения подвижки в два и более раза больше средней подвижки по всему разрыву, светлым тоном изображена вся оставшаяся зона

Таблица 2

Характеристики зон разрыва

№ п/п	Магнитуда	Отношение Sa/S	Количество связных зон	Средний угол подвижки, Slip_a
1	8,3	0,17	1	24°
2*	7,9	0,19	2	101°
3	7,0	0,15	1	–84°
4*	7,6	0,18	3	102°
5*	8,3	0,16	1	109°
6	8,1	0,16	1	–72°
7	7,5	0,19	2	99°
8*	7,8	0,19	1	79°
9	7,3	0,16	3	–33°
10	7,5	0,18	3	87°

Примечание. Номер землетрясения в таблице соответствует порядковому номеру, приведенному в табл. 1; события, обозначенные звездочкой, использовались для оценки средних параметров межплитовых землетрясений.

типов землетрясений, но близко к значению 0,22, принятому в практике моделирования синтетических акселерограмм.

Сам факт того, что средний угол подвижки превышает 90°, означает, что взбросы происходят с небольшой сдвиговой компонентой. Очевидно, что данные механизмы (см. рис. 1, 2) в целом соответствуют современным представлениям о геодинамике исследуемого района [23].

Положение точки начала вспарывания (или, другими словами, гипоцентр землетрясения) относительно крупного пятна с повышенными значениями подвижки является важным фактором, который учитывается в моделировании синтетических акселерограмм. Проанализировав рис. 5, мы заключили, что точка начала вспарывания расположена в центре пятна с возможными случайными вариациями. Самое крупное пятно расположено в центре разрыва либо его верхней части, хотя положение пятна, по всей видимости, подвержено случайным отклонениям.

Стохастическая модель очага межплитового землетрясения

Для того чтобы учесть эмпирические данные короткопериодного излучения (представляющие интерес в инженерной сейсмологии) при синтезе теоретических сейсмограмм в рамках «рецепта», предложенного Ирикурой и его командой [10], площадка разрыва задается как модель с пятнами из неровностей и фоновой частью очага (где нет неровностей). Практика показывает, что наилучшее совпадение теоретических и наблюденных записей достигается именно для такой модели. Каким образом реализуется следующее землетрясение в зоне субдукции, т.е. где именно будут пятна и их количество, никто не знает, поэтому положение пятен и некоторые другие характеристики очага описываются случайными функциями и на основе заданных распределений генерируется набор сценарных землетрясений. Многие полуэмпирические соотношения, используемые в «рецепте», получены по результатам динамического моделирования трещины, распространяющейся по очагу с неоднородным распределением напряжения.

«Рецепт» прошел успешную апробацию в ряде сейсмических регионов. Данный метод рекомендован при проектировании и строительстве объектов атомной энергетики (например, [24]).

«Рецепт» состоит из последовательных шагов. Задаются: 1) пространственное положение площадки разрыва; 2) комбинация параметров площадки разрыва, сейсмического момента и среднего сброшенного напряжения по всему очагу (на практике определяется по низкочастотным спектрам смещений); 3) неровности прямоугольной формы и положение точки начала вспарывания; 4) суммарная площадь неровностей; 5) локальное сброшенное напряжение на неровностях (на практике определяется по высокочастотным спектрам ускорений).

Площадка разрыва в пространстве-времени описывается как сетка субисточников, у которых функция скорости подвижки конструируется путем суммирования сдвинутых по пространству и времени набора сглаженного варианта функций типа $t^{-0,5}$ по Б.В. Кострову. При этом амплитуда скорости подвижки отдельного субисточника рассчитывается из значений локального эффективного напряжения с учетом некоторых материальных параметров и констант. Локальное эффективное напряжение оценивается исходя из принадлежности сегмента области высокой подвижки (неровности) или фоновой части очага (где нет неровностей). Предполагается, что эффективное напряжение на неровности равно локальному сброшенному напряжению на ней, а эффективное напряжение на фоновой части очага (где нет неровностей) определяется из баланса напряжении. Этот баланс обусловлен в том числе и уровнем выделения (или задания) пятен.

На основе проанализированных данных предложена стохастическая модель очага характеристического землетрясения (М ~ 8), возникающего на контакте двух плит в пределах Курило-Камчатского сегмента субдукции. Модель описывается случайными переменными. Количественные параметры модели приведены ниже, некоторые из них импортированы из других субдукционных регионов с хорошей изученностью.

Магнитуда. Моментная магнитуда сценарного землетрясения является случайной переменной, которая варьируется в разумном диапазоне магнитуд, например от 7,7 до 8,3. Применяется равномерное распределение случайной величины.

Геометрические характеристики площадки. Согласно [25], набор параметров площадки разрыва определяется по эмпирическим данным. Так как ошибки наблюдений в регрессионных соотношениях сильно коррелируют между собой, то они задаются многомерным нормальным распределением с учетом ковариационной матрицы. Использование усеченного набора параметров с такими же эмпирическими характеристиками многомерного нормального распределения, полученными для расширенного набора, не совсем корректно. Поэтому мы используем подход, в рамках которого первоначально задается ширина разрыва по значению моментной магнитуды, а длина разрыва является случайной функцией, описываемой равномерным распределением. Принимается, что в среднем длина разрыва в три раза больше ширины [13]. Случайные отклонения от среднего задают стохастические реализации площадок с различными размерами.

Ширина разрыва (W) определяется по корреляционному соотношению, предложенному в [25] для субдукционных межплитовых землетрясений:

$$\lg[W, \text{км}] = -0,88 + 0,366 \times Mw. \quad (4)$$

Длина разрыва (L) определяется исходя из коэффициента подобия (a) для субдукционных землетрясений:

$$L = \alpha \times W. \quad (5)$$

Данная случайная равномерно распределенная величина задана в диапазоне от 0,5 до 5,5 [13].

После того как длина (L) и ширина (W) разрыва заданы, выполняется масштабирование площадки путем нормировки [10]:

$$L \times W\ [\text{км}^2] = 4,24 \times 10^{-11} \times ([M_0, \text{Дж}] \times 10^7)^{0,5} \quad (6)$$

где M_0 – скалярный сейсмический момент, который связан с моментной магнитудой следующим выражением:

$$Mw = 2 / 3 \times (\lg[M_0, \text{Дж}] - 9{,}1) \quad (7)$$

Средняя подвижка. Средняя подвижка (Dm) определяется исходя из определения сейсмического момента:

$$Dm\ [\text{м}] = [M_0, \text{Дж}] / \mu / [L \times W, \text{м}^2] \quad (8)$$

где m – модуль сдвига, который обычно принимается равным 4×10^{10} Н/м^2.

Ориентация разрыва в пространстве. Под ориентацией разрыва принимаются: средний угол простирания разрыва (Str), средний угол падения разрыва (Dip) и углы подвижки для каждого сегмента разрыва (Slip). Данные характеристики описываются равномерным распределением исходя из полученных (см. разд. «Результаты и обсуждение») средних характеристик и их отклонений: Str = 217,2 ± 9,5°, Dip = 19,8° ± 5,84°, Slip = 95,6° ± 10,95°.

Положение пятен и их количество. Некоторые исследователи, изучающие крупные субдукционные межплитовые землетрясения, уверены, что пятна стационарны во времени (например, [26]). «Дырки» на картах сейсмичности по данным детальных сейсмологических наблюдений ассоциируются с барьерами прочности, положение которых в пространстве не меняется со временем [26, 27]. Для исследуемого района таких данных (за исключением отдельных небольших участков в районе Камчатки и Южных Курил) нет. Единственная возможность корректно задать сейсмические воздействия в рамках вероятностного подхода – это перебор возможных реализаций (в разумных диапазонах). Из рис. 5 видно, что пятна распложены либо в центре плоскости, либо в ее верхней части, поэтому можно ограничиться двумя равновероятными сценариями.

Результаты анализа показывают, что на разрыве могут располагаться от одного до трех пятен. Если в модели с одним пятном все более или менее ясно, то с двумя и более пятнами не совсем понятно, как распределить общую площадь неровностей по этим пятнам в рамках детерминистической модели. Однако в рамках стохастического моделирования мы можем отбирать только те модели, которые удовлетворяют условиям: 1) наличие от одного до трех пятен; 2) самое крупное пятно расположено в центре или верхней части плоскости; 3) суммарная площадь пятен составляет 0,18´ S, где S – площадь разрыва. Данные условия будут проверяться теми же уровнями выделения пятен, заданными в настоящей статье.

Размер пятна. Пятно задается площадкой, размеры которой определяются исходя из соотношений:

$$La = \beta \times L, \quad (9)$$

$$Wa = \beta \times W, \quad (10)$$

где La – размер пятна вдоль простирания разрыва, Wa – размер пятна вдоль падения разрыва, коэффициент β является константной и задается исходя из полученного ранее соотношения Sa/S: $\beta^2 = 0{,}18$.

Положение точки начала вспарывания. Как уже было сказано выше, положение точки начала вспарывания (гипоцентра землетрясения) – важный фактор, который учитывается в моделировании синтетических акселерограмм. Например, в [3] показано, что вспарывание начинается в среднем вне пятна. Однако авторы рассматривали в основном коровые события в пределах трансформных разломов. В нашем случае другой тектонический тип и фокальный механизм землетрясений.

Мы видим (рис. 5), что гипоцентр землетрясений находится в пределах закрашенных областей. Исключение составляет случай 2, здесь гипоцентр вообще выпадает за пределы площадки. Видимо, сказывается точность инверсии и определения координат гипоцентра для относительно небольших магнитуд $M \sim 7$. Поэтому этот случай можно отбросить и не рассматривать далее. То есть мы можем уверенно говорить о 8 из 9 случаев попадания точки начала вспарывания в область пятна. В японском сегменте зоны субдукции в целом схожая картина [27]. При этом точка начала вспарывания расположена в центре разрыва с возможными вариациями. Эти вариации могут приводить в том числе к случаям, когда вспарывание начинается за пределами пятна.

Примем, что такие вариации носят случайный характер, они контролируются двумя случайными переменными – расстоянием от гипоцентра до центра площадки вдоль простирания и падения разрыва. Данные переменные пробегают значения от 0 до 1/4 размера вдоль соответствующей оси.

Попробуем оценить вероятность того, что вспарывание начнется внутри пятна в рамках принятых диапазонов. Для простоты рассмотрим модель очага с прямоугольным пятном в центре разрыва. Тогда вероятность того, что точка начала вспарывания окажется внутри пятна, задается отношением площади пятна ($\beta^2 \times L \times W$) к площади, охватываемой возможными вариациями точки начала вспарывания ($(0{,}25 + 0{,}25)^2 = L \times W$). В итоге искомая вероятность равна 0,72, что немного меньше апостериорной вероятности 0,89 (8/9), но вполне пригодно для начального приближения.

Выводы

Проанализировано распределение вектора подвижки на площадках разрыва крупных землетрясений (М 7,0–8,3), произошедших в пределах Курило-Камчатской островной дуги.

Разработан программный код для автоматической обработки данных finite fault, публикуемых информационным ресурсом USGS. Анализ имеющихся данных позволил впервые получить важную информацию о характеристиках протяженных источников в районе субдукции. Ценность полученной информации заключается в уточнении удельной площади, занимаемой высокой подвижкой.

На основе анализа крупных (М ≥7,5) межплитовых землетрясений можно выделить общее сходство – это преимущественно взбросовый тип механизма очага, а также наличие крупного пятна с относительно повышенными значениями подвижки в верхней половине или центре нодальной плоскости.

Среднее (по всем землетрясениям) отношение площади, где локальное значение подвижки в 2 и более раза больше среднего по всему очагу, ко всей площади разрыва составляет 0,17. Для межплитовых землетрясений это значение составляет 0,18. Количество крупных пятен варьируется от одного до трех.

Получены средние геометрические характеристики межплитовых землетрясений. Среднее значение угла простирания составляет 217,2°, угла падения – 19,8°, угла подвижки – 95,6°. По данным программы Slab2.0 [28, 29], в которой представлена трехмерная модель погружающейся плиты, среднее на всем Курило-Камчатском сегменте простирание составляет 212°, падение – 23,3° (угол падения усреднялся до глубины 60 км). В целом полученные оценки находятся в хорошем соответствии с независимыми данными.

Предложена стохастическая модель очага характеристического (М ~8) межплитового землетрясения, описываемая фрагментированной структурой вектора подвижки. Полученные в настоящей работе результаты можно в дальнейшем использовать при стохастической симуляции каталога протяженных сейсмических источников в районе Курило-Камчатского сегмента зоны субдукции, а кроме того, данные результаты можно применять и к внутриплитовым землетрясениям, однако в этом случае ориентация разрыва внутри плиты задается случайными углами, а механизм и положение очага задаются согласно предложенной сейсмотектонической модели зоны субдукции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Cienfuegos R., Catalán P. A., Urrutia A., Benavente R., Aránguiz R., González G. What can we do to forecast tsunami hazards in the near field given large epistemic uncertainty in rapid seismic source inversions // Geophys. Res. Lett. 2018. Vol. 45. P. 1–12. DOI: 10.1029/2018GL076998.

2. Davies G. Tsunami variability from uncalibrated stochastic earthquake models: tests against deep ocean observations 2006–2016 // Geophys. J. Int. 2019. Vol. 218 (3). P. 1939–1960. DOI: 10.1093/gji/ggz260.

3. Somerville P., Irikura K., Graves R. et al. Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion // Seismol. Res. Lett. 1999. Vol. 70 (1). P. 59–80.

4. Mai P. M., Beroza G. C. A spatial random field model to characterize complexity in earthquake slip // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2002. Vol. 107 (11). ESE-10. DOI:10.1029/2001JB000588.

5. Goda K., Petrone C., de Risi R., Rossetto T. Stochastic coupled simulation of strong motion and tsunami for the 2011 Tohoku, Japan earthquake // Stoch. Environ. Res. Risk Assess. 2017. Vol. 31. P. 2337–2355. DOI: 10.1007/s00477-016-1352-1.

6. Crempien J.G.F., Urrutia A., Benavente R., Cienfuegos R. Effects of earthquake spatial slip correlation on variability of tsunami potential energy and intensities // Sci. Rep. 2020. Vol. 10. 8399. DOI: 10.1038/s41598-020-65412-3.

7. Tang Y. An Updated Corner-Frequency Model for Stochastic Finite-Fault Ground-Motion Simulation // Bull. Seismol. Soc. Am. 2022. Vol. 112. P. 921–938. DOI: 10.1785/0120210205.

8. Sepúlveda I., Liu P.L.-F., Grigoriu M., Pritchard M. Tsunami hazard assessments with consideration of uncertain earthquake slip distribution and location // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2017. Vol. 122. P. 7252–7271. DOI: 10.1002/ 2017JB014430.

9. Mulia I. E., Ishibe T., Satake K. et al. Regional probabilistic tsunami hazard assessment associated with active faults along the eastern margin of the Sea of Japan // Earth Planets Space. 2020. Vol. 72. 123. DOI:10.1186/s40623-020-01256-5.

10. Irikura K., Miyake H. Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios // Pure Appl. Geophys. 2011. Vol. 168 (1/2). P. 85–104. DOI: 10.1007/s00024-010-0150-9.

11. Nakahara H. Seismogram envelope inversion for high-frequency seismic energy radiation from moderate-to-large earthquakes // Adv. Geophys. 2008. Vol. 50. P. 401–426.

12. Гусев А. А. Стохастическое моделирование протяженного очага землетрясения для характеризации сейсмической опасности. 1. Обоснование и общая структура алгоритма // Вопр. инж. сейсмол. 2013. Т. 40, № 1. С. 5–18.

13. Martinez Alcala K. Stochastic Source Modelling and Tsunami Analysis of the 2012 Mw 7.8 Haida Gwaii Earthquake // Electronic Thesis and Dissertation Repository. 2021. 8145. URL: https://ir.lib.uwo.ca/etd/8145 (data of access: 31.05.2023).

14. Гусев А. А., Павлов В. М., Гусева Е. М. Стохастическое моделирование протяженного очага землетрясения для характеризации сейсмической опасности. 3. Способ анализа неопределенности и практическое опробование процедуры // Вопр. инж. сейсмол. 2014. Т. 41, № 1. С. 39–56.

15. Nicknam A., Eftekhari S. N., Yazdani A. Estimation of near fault ground motion based on a hybrid source model and a theoretical Green's function method // *Journal of Vibroengineering*. 2015. Vol. *17*. P. 357–368.

16. Gusev A. A. Multiasperity fault model and the nature of short-period subsources // Pure Appl. Geophys. 1989. Vol. 130. P. 635–660. DOI: 10.1007/BF00881602.

17. National Earthquake Information Center of United States Geological Survey. URL: https://earthquake.usgs.gov/ (data of access: 31.05.2023).

18. Earthquake Source Model Database. URL: http://equake-rc.info/srcmod/ (data of access: 31.05.2023).

19. National Earthquake Information Center of United States Geological Survey. URL: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/official20110311054624120_30/executive (data of access: 31.05.2023).

20. Сафонов Д. А., Коновалов А. В., Злобин Т. К. Урупская серия землетрясений 2012–2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2015. № 6. С. 60–70.

21. Morikawa N., Fujiwara H. A new ground motion prediction equation for Japan applicable up to M9 mega-earthquake // J. Disaster Res. 2013. Vol. 8, N5. P. 878–888.

22. Lee Y.T., Ma K.F., Hsieh M.C., Yen Y.T., Sun Y.S. Synthetic ground-motion simulation using a spatial stochastic model with slip self-similarity: Toward near-source ground-motion validation // Terr. Atmos. Ocean. Sci. 2016. Vol. 27. P. 397–405. DOI: 10.3319/TAO.2015.11.27.01(TEM).

23. Kozhurin A. Active faults in Sakhalin and North of the Sea of Okhotsk: Does the Okhotsk plate really exist? // J. Asian Earth Sci. 2022. Vol. 230. 105219. DOI: 10.1016/j.jseaes.2022.105219.

24. Ground motion simulation based on fault rupture modelling for seismic hazard assessment in site evaluation for nuclear installations. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2015. (Safety reports series, ISSN1020-6450; N85).

25. Kumar K., Thingbaijam S., Mai P.M., Goda K. New empirical earthquake source-scaling laws // Bull. Seismol. Soc. Am. 2017. Vol. 107, N5. P. 2225–2246.

26. Takahashi H., Kasahara M.J. Spatial relationship between interseismic seismicity, coseismic asperities and aftershock activity in the Southwestern Kuril Islands // Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region / eds J. Eichelberger, E. Gordeev, P. Izbekov, M. Kasahara, J. Lees. 2007. P. 153–164. DOI: 10.1029/172GM14.

27. Yamanaka Y., Kikuchi M. Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data // J. Geophys. Res. 2004. 109. B07307. DOI: 10.1029/2003JB002683.

28. Hayes G.P., Moore G.L., Portner D.E., Hearne M., Flamme H., Furtney M., Smoczyk G.M. Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model // Science. 2018. Vol. 362. P. 58–61. DOI: 10.1126/science.aat4723.

29. Information resource. URL: https://github.com/usgs/slab2 (data of access: 31.05.2023).

REFERENCES

1. Cienfuegos R., Catalán P.A., Urrutia A., Benavente R., Aránguiz R., González G. What can we do to forecast tsunami hazards in the near field given large epistemic uncertainty in rapid seismic source inversions. *Geophysical Research Letters*. 2018;45:1–12. DOI: 10.1029/2018GL076998.

2. Davies G. Tsunami variability from uncalibrated stochastic earthquake models: tests against deep ocean observations 2006–2016. *Geophysical Journal International*. 2019;218(3):1939–1960. DOI: 10.1093/gji/ggz260.

3. Somerville P., Irikura K., Graves R. et al. Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion. *Seismological Research Letters*. 1999;70(1):59–80.

4. Mai P.M., Beroza G.C. A spatial random field model to characterize complexity in earthquake slip. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth.* 2002;107(11): ESE-10. DOI: 10.1029/2001JB000588.

5. Goda K., Petrone C., de Risi R., Rossetto T. Stochastic coupled simulation of strong motion and tsunami for the 2011 Tohoku, Japan earthquake. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment.* 2017;31:2337–2355. DOI: 10.1007/s00477–016–1352–1.

6. Crempien J.G.F., Urrutia A., Benavente R., Cienfuegos R. Effects of earthquake spatial slip correlation on variability of tsunami potential energy and intensities. *Scientific Reports*. 2020;10. 8399. DOI: 10.1038/s41598-020-65412-3.

7. Tang Y. An Updated Corner-Frequency Model for Stochastic Finite-Fault Ground-Motion Simulation. *Bulletin of the Seismological Society of America.* 2022;112:921–938. DOI: 10.1785/0120210205.

8. Sepúlveda I., Liu P.L.-F., Grigoriu M., Pritchard M. Tsunami hazard assessments with consideration of uncertain earthquake slip distribution and location. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*. 2017;122:7252–7271. DOI: 10.1002/ 2017JB014430.

9. Mulia I.E., Ishibe T., Satake K. et al. Regional probabilistic tsunami hazard assessment associated with active faults along the eastern margin of the Sea of Japan. *Earth Planets Space*. 2020;72. 123. DOI: 10.1186/s40623-020-01256-5.

10. Irikura K., Miyake H. Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios. *Pure and Applied Geophysics*. 2011;168(1/2):85–104. DOI: 10.1007/s00024–010–0150–9.

11. Nakahara H. Seismogram envelope inversion for high-frequency seismic energy radiation from moderate-to-large earthquakes. *Advances in Geophysics*. 2008;50:401–426.

12. Gusev A.A Stochastic simulation of extended earthquake source for application in seismic hazard estimation. 1. Basics and general structure of the algorithm. *Problems of Engineering Seismology.* 2013;(1):5–18.

13. Martinez Alcala K. Stochastic Source Modelling and Tsunami Analysis of the 2012 Mw 7.8 Haida Gwaii Earthquake. *Electronic Thesis and Dissertation Repository*. 2021. 8145. URL: https://ir.lib.uwo.ca/etd/8145 (data of access: 31.05.2023).

14. Gusev A.A., Pavlov V.M., Guseva E.M. Stochastic simulation of extended earthquake source for application in seismic hazard estimation. 3. Methods of analysis of uncertainty and practical testing of the procedure. *Problems of Engineering Seismology.* 2014;(1):39–56.

15. Nicknam A., Eftekhari S.N., Yazdani A. Estimation of near fault ground motion based on a hybrid source model and a theoretical Green's function method. *Journal of Vibroengineering.* 2015;*17:*357–368.

16. Gusev A.A. Multiasperity fault model and the nature of short-period subsources. *Pure and Applied Geophysics.* 1989;130:635–660. DOI: 10.1007/BF00881602.

17. National Earthquake Information Center of United States Geological Survey. URL: https://earthquake.usgs.gov/ (data of access: 31.05.2023).

18. Earthquake Source Model Database. URL: http://equake-rc.info/srcmod/ (data of access: 31.05.2023).

19. National Earthquake Information Center of United States Geological Survey. URL: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/official20110311054624120_30/executive (data of access: 31.05.2023).

20. Safonov D.A., Konovalov A.V., Zlobin T.K. The Urup earthquake sequence of 2012–2013. *Journal of Volcanology and Seismology.* 2015;9(6):402–411. DOI: 10.1134/S074204631506007X.

21. Morikawa N., Fujiwara H. A new ground motion prediction equation for Japan applicable up to M9 mega-earthquake. *Journal of Disaster Research*. 2013;8(5):878–888.

22. Lee Y.T., Ma K.F., Hsieh M.C., Yen Y.T., Sun Y.S. Synthetic ground-motion simulation using a spatial stochastic model with slip self-similarity: Toward near-source ground-motion validation. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences.* 2016;27:397–405. DOI: 10.3319/TAO.2015.11.27.01(TEM).

23. Kozhurin A. Active faults in Sakhalin and North of the Sea of Okhotsk: Does the Okhotsk plate really exist? *Journal of Asian Earth Sciences*. 2022;230. 105219. DOI: 10.1016/j.jseaes.2022.105219.

24. Ground motion simulation based on fault rupture modelling for seismic hazard assessment in site evaluation for nuclear installations. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2015. (Safety reports series, ISSN1020–6450; N85).

25. Kumar K., Thingbaijam S., Mai P.M., Goda K. New empirical earthquake source-scaling laws. *Bulletin of the Seismological Society of America.* 2017;107(5):2225–2246.

26. Takahashi H., Kasahara M.J. Spatial relationship between interseismic seismicity, coseismic asperities and aftershock activity in the Southwestern Kuril Islands. In: Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region; 2007. P. 153–164. DOI: 10.1029/172GM14.

27. Yamanaka Y., Kikuchi M. Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data. *Journal of Geophysical Research.* 2004;109. B07307. DOI: 10.1029/2003JB002683.

28. Hayes G.P., Moore G.L., Portner D.E., Hearne M., Flamme H., Furtney M., Smoczyk G.M. Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model. *Science*. 2018;362:58–61. DOI: 10.1126/science.aat4723.

29. Information resource. URL: https://github.com/usgs/slab2 (data of access: 31.05.2023).

Научная статья
УДК 004.932.2
DOI: 10.31857/S0869769824020033
EDN: ldnkmo

Разработка метода детектирования объектов транспортных потоков по спутниковым фотоснимкам сверхвысокого разрешения

И.Н. Пугачев✉, В.С. Тормозов

Игорь Николаевич Пугачев
доктор технических наук, доцент
Хабаровский федеральный исследовательский центр ДВО РАН, Хабаровск, Россия
ipugachev64@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-0345-4350

Владимир Сергеевич Тормозов
кандидат технических наук, доцент
Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия
007465@pnu.edu.ru
https://orcid.org/0000-0002-5628-858X

Аннотация. Описывается набор алгоритмов, использующихся для распознавания объектов на спутниковых фотографиях высокого качества. Этот метод обладает уникальной возможностью обнаруживать объекты, размеры которых на изображениях не превышают нескольких десятков пикселей. На фотографии исследуется каждый отличительный участок изображения, чтобы определить присутствие объекта определенного класса, и рассчитывается вероятность этого присутствия на рассматриваемом участке. По результатам анализа изображения делается вывод о наличии и вероятном местонахождении объекта. Дается также подробное объяснение того, как изучаются и параметризуются алгоритмы, используемые в процессе обнаружения. С учетом результатов исследования можно автоматизировать широкий спектр процессов, например, упростить сбор и анализ данных в многочисленных аналитических системах. Метод обладает огромным потенциалом и может быть продуктивно использован в различных областях, связанных с обработкой изображений и анализом данных, в частности, применен для эффективного управления дорожным движением, обеспечения равномерной загрузки транспортной сети на пределе ее пропускной способности, не допуская перегрузки уязвимых зон, а также прогнозирования развития транспортной обстановки. Он способствует ускорению алгоритма детектирования транспортных средств на спутниковых снимках, позволяет оценивать состояние дорожного движения и эффективность его организации, выявлять и прогнозировать развитие процессов, влияющих на состояние дорожного движения, а также контролировать сферу безопасности и организации дорожного движения.

Ключевые слова: нейронная сеть, система управления транспортным потоком, детектирование, распознавание образов, селективный поиск, обучающая выборка, спутниковые снимки, компьютерное зрение

Для цитирования: Пугачев И.Н., Тормозов В.С. Разработка метода детектирования объектов транспортных потоков по спутниковым фотоснимкам сверхвысокого разрешения // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 2. С. 33–41. http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020033, EDN: ldnkmo

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, дополнительное соглашение от 21.04.2020 № 075-02-2020-1529/1.

Original article

Development of a method for detecting traffic flow objects from satellite photographs with high image quality

I.N. Pugachev, V.S. Tormozov

Igor N. Pugachev
Doctor of Sciences in Technics, Associate Professor
Khabarovsk Federal Research Center of the FEB RAS, Khabarovsk, Russia
ipugachev64@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-0345-4350

Vladimir S. Tormozov
Candidate of Sciences in Technics, Associate Professor
Pacific State University, Khabarovsk, Russia
007465@pnu.edu.ru
https://orcid.org/0000-0002-5628-858X

Abstract. A set of algorithms used to recognize objects in high-quality satellite photographs is described. This method has a unique ability to detect objects whose dimensions in images do not exceed several tens of pixels. In a photograph, each distinctive area of the image is examined to determine the presence of an object of a certain class, and the probability of this presence in the area in question is calculated. Based on the results of image analysis, a conclusion is drawn about the presence and probable location of the object. A detailed explanation is also given of how the algorithms used in the detection process are learned and parameterized. Taking into account the research results, a wide range of processes can be automated, for example, simplifying the collection and analysis of data in numerous analytical systems. The method has enormous potential and can be effectively used in various fields related to image processing and data analysis, in particular, used for effective traffic management, ensuring uniform loading of the transport network at the limit of its capacity, avoiding overloading of vulnerable areas, as well as forecasting the development of the transport situation. It helps speed up the algorithm for detecting vehicles on satellite images, allows you to assess the state of road traffic and the effectiveness of its organization, identify and predict the development of processes affecting the state of road traffic, as well as monitor the field of safety and traffic management.

Keywords: neural network, traffic flow control system, detection, pattern recognition, selective search, training set, satellite images, computer vision

For citation: Pugachev I.N., Tormozov V.S. Development of a method for detecting traffic flow objects from satellite photographs with high image quality. *Vestnik of the FEB RAS.* 2024;(2):33–41. http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020033, EDN: ldnkmo

Funding. The work was supported by the Ministry of Science and Education of the Russian Federation, supplementary agreement dated April 21, 2020 N075-02-2020-1529/1.

Введение

Транспортные системы городов сегодня перегружены, а системы мониторинга громоздки, дорогостоящи и не отражают единовременной целостной картины. Требуется новая технологическая платформа, обеспечивающая доступный, достоверный, комплексный мониторинг систем. В связи с этим тема исследований, направленных на разработку методологии применения материалов космического зондирования земли для решения задач мониторинга и оптимизации транспортной инфраструктуры, весьма актуальна.

Космические снимки сверхвысокого (от 0,3 до 1 м) пространственного разрешения могут отображать большие территории, в частности территории различных населенных пунктов – от мелких до крупных городов [1].

Нашей целью являлась разработка метода детектирования и классификации объектов для оценки интенсивности и состава транспортного потока по спутниковым снимкам сверхвысокого разрешения и географической информации о расположении и ширине дорог. Основными задачами исследования стали: анализ алгоритмов и методов оценки показателей транспортного потока (ТП) с использованием спутниковых снимков сверхвысокого разрешения, а также алгоритмов детектирования и классификации транспортных средств (ТС) на таких снимках; разработка алгоритма извлечения со снимков изображений отдельных перегонов дорожной сети.

Из перечня основных параметров дорожного движения следует выделить два: состав ТП и количество ТС, приходящихся на один километр полосы движения (плотность движения). Данные параметры возможно определять фактически, а не расчетом единовременно на всей улично-дорожной сети (УДС) города, в различные периоды времени, с применением космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения.

Материалы и методы исследований

Одним из факторов, осложняющих детектирование и классификацию ТС, является то, что снимки с очень высоким разрешением, от 0,3 до 1 м, могут содержать только несколько пикселей для установления размеров и характеристик ТС. Например, автомобиль размером 3200 на 1420 мм будет представлен всего лишь 3 пикселями в длину и 1 пикселем в ширину. Это сильно осложняет их распознавание и классификацию.

Для исследования была создана экспериментальная система «TDC extractor» с использованием методов цифровой обработки изображений, распознавания образов и машинного обучения для обнаружения и классификации транспортных средств на конкретном участке УДС [2, 3]. В качестве базы для построения программной системы была выбрана библиотека глубокого обучения *Caffe*, написанная на языке программирования С++. Программная система включает в себя несколько основных компонентов:

1. Модуль сужения области детектирования, использующий географические данные о расположении дорожных участков в городе для сужения области поиска ТС.

2. Модуль генерации гипотез, который включает алгоритмы селективного поиска и их фильтрации, основан на низкочастотной информации и размерах объектов.

3. Модуль распознавания визуальных объектов, основанный на сверточной нейронной сети второго порядка. Модуль распознавания визуальных объектов решает задачи определения принадлежности гипотезы одному из классов ТС: легковое авто, грузовое авто, автобус, мототранспорт.

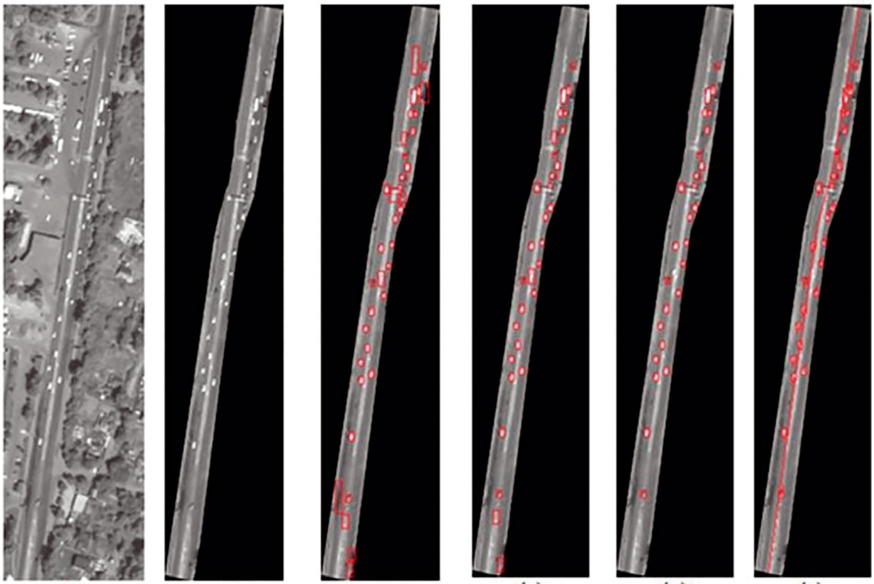


Рис. 1. Базовые стадии работы метода детектирования и классификации ТС*: а* – участок спутникового снимка, включающий в себя изображение перегона; *б* – изображение перегона в рамках рассматриваемого участка, полученное программной реализацией алгоритма сокращения области поиска; *в* – множество гипотез, полученных модифицированным алгоритмом селективного поиска; *г* – набор гипотез, оставшихся в результате выполнения фильтрации по низкочастотной информации и по размерам; *д* – множество детектированных ТС, для которых была выполнена классификация; *е* – ТС с определенным направлением движения, полученным исходя из относительной позиции на дорожном полотне

Модули, которые решают проблемы обнаружения и классификации транспортных средств, включают все вышеперечисленные составные компоненты. В данной статье не рассматриваются модули, выполняющие расчеты числовой оценки показателей транспортного потока.

На рис. 1 изображен процесс обнаружения и классификации транспортных средств методом обработки спутниковых изображений. Конечным результатом работы системы является численное значение транспортных средств, обнаруженных на каждом этапе процедуры детектирования, по категориям и направлениям движения [4].

В ходе проведенных исследований на программной системе «TDC extractor» были качественно оценены разработанные алгоритмы, составляющие систему детектирования и классификации: алгоритмов сокращения области поиска, алгоритмов выборочного поиска с фильтрацией гипотез.

Для обучения нейронной сети создаются две базы из обучающей и тестирующей выборки, которые записываются в базу данных формата *lmdb* (*Lightning Memory-Mapped Database*). Данная база представляет собой высокопроизводительную встроенную транзакционную базу данных и созданных к ним масок.

После детектирования необходимо классифицировать транспортные средства по типам. Классификация будет осуществляться с помощью семантической классификации с использованием сверточных нейронных сетей (*Convolutional Neural Network – ConvNet/CNN*). Для глубокого обучения нейронной сети существует большое разнообразие различных программных библиотек.

Искусственные нейронные сети могут менять свое поведение в зависимости от внешней среды. Данный фактор в большей степени, чем любой другой, ответствен за тот интерес, который они вызывают. После предъявления входных сигналов (возможно, вместе с требуемыми выходами) они самостоятельно настраиваются, чтобы обеспе-

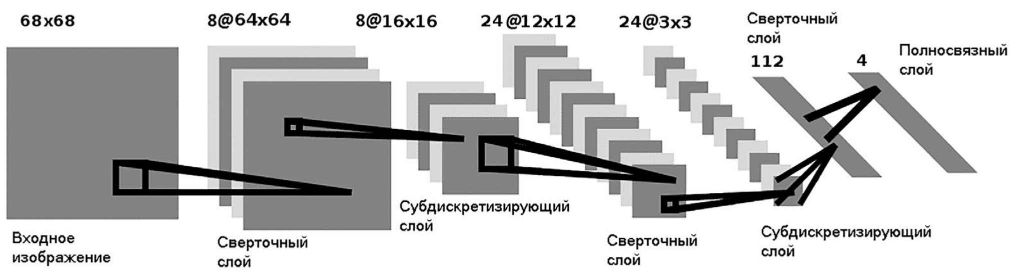


Рис. 2. Структурная схема используемой *CNN*

чивать требуемую реакцию. Было разработано множество обучающих алгоритмов, каждый со своими сильными и слабыми сторонами. Все еще существуют проблемы относительно того, чему нейронная сеть может обучиться и как обучение должно проводиться.

Это показывает, что работы предлагаемого направления являются актуальными на сегодняшний момент.

Для проведения исследований была выбрана среда обучения *Caffe*, разработанная Яньцинем Цзя в университете Беркли. Данная библиотека, поддерживающая множество типов машинного обучения, нацелена в первую очередь на решение задач классификации и сегментации. Для того чтобы построить и обучить модель распознавания в библиотеке, объявлена функция *Caffe* с параметром обучения (*train*) и входным файлом, определяющим структуру и базовые параметры модели. На выходе получится файл формата *caffemodel*, используемый для сохранения и перенесения модели.

На рис. 2 показана общая схема сверточной нейронной сети, использованной в данной работе. Приведены количество и размер карт признаков для каждого слоя, а также формулы для вычисления значений, проходящих через сигнальные слои.

Кроме того, было исследовано качество разработанного алгоритма, в том числе модулей сужения области поиска и выборочного поиска с допущениями фильтрации. Сверточная нейронная сеть была обучена на 100 раундов.

Результаты исследований и их обсуждение

Проанализированы результаты проведенных экспериментов. Анализ показал, что увеличение размера обучающей выборки приводит к улучшению качества сети [4]. На рис. 3 показан график зависимости ошибки обучения *CNN* от количества эпох для различных размеров обучающей выборки. Минимальная ошибка обучения на предъявляемом алгоритму наборе была равна 1%. Минимальная ошибка тестирования составила 7,3%.

В таблице показаны данные каждого слоя (количество и размер ядер свертки) и формула расчета для каждого слоя свертки, слоя подвыборки и полносвязного слоя.

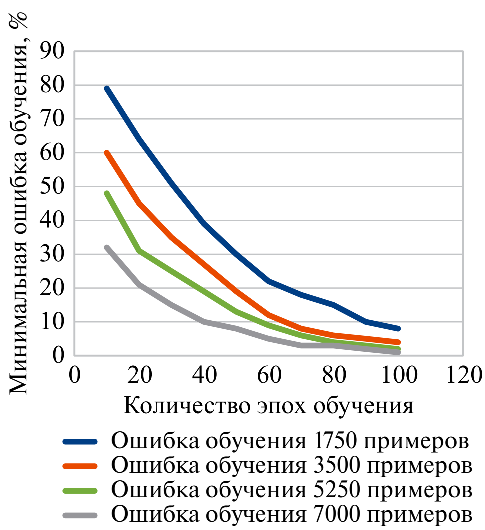


Рис. 3. Полученные в результате исследования графики зависимости ошибки обучения CNN от количества эпох обучения (1750, 3500, 5250, 7000 примеров в обучающей выборке)

Структура используемой *CNN*

№ п/п	Слой	Размеры ядра	Количество каналов	Формулы формирования сигнала
	Вход	Входное изображение 68 × 68		
1	Сверточный слой C1 (с нейронами 2-го порядка) на выходе 16 каналов 63 × 4	5 × 5	8	$y_j = f(\sum_{i=1}^{m}\left(w_{ji}(k)y_i(k) + u_{ji}(k)y_i^2(k)\right)$
2	Субдискретизирующий слой S1 на выходе 16 каналов	4 × 4	8	$y_j = f\left(a_j \max\left(y_j\right)\right)$
3	Сверточный слой C2 (с нейронами 2-го порядка)	5 × 5	24	$y_j = f\left(\sum_{i=1}^{m}\left(w_{ji}(k)y_i(k) + u_{ji}(k)y_i^2(k)\right)\right)$
4	Субдискретизирующий слой S2	4 × 4	24	$y_j = f\left(a_j \max\left(y_j\right)\right)$
5	Сверточный слой C3	3 × 3	112	$y_j = f\left(\sum_{i=1}^{m}\left(w_{ji}(k)y_i(k)\right)\right)$
6	Полносвязный слой F			$y_j = f\left(\sum_{i=1}^{n}\left(w_{ji}(k)y_i(k)\right)\right)$
Выход		4 классификационных сигнала от полносвязного слоя		

В вышеприведенной таблице $f(\ldots)$ – сигмоидальная функция активации нейронов сети:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}.$$

Нейроны более высокого порядка могут быть введены в любой слой *CNN*: сверточный и полносвязный слои, даже слои субдискретизации. Однако добавление различных типов слоев может по-разному влиять на характеристики нейронной сети, такие как точность распознавания объектов и способность к обобщению, вследствие чего и влияние на результат работы сети будет различным. В ходе исследования было установлено, что первый и второй сверточные слои оказались лучшим выбором для внедрения нейронов второго порядка. Нецелесообразно использовать нейроны на третьем сверточном слое, поскольку это приводит к увеличению вычислительной сложности без улучшения качества нейронной сети.

Оригинальность исследований состоит в использовании исходных данных, полученных с применением космических снимков для построения транспортных моделей территории, с решением задач подбора космических материалов, условий съемки, оптимизации. Предлагаемая методика построения транспортной модели территории на основе данных космического зондирования включает в себя необходимые процедуры: процедура определения оптимальных параметров космической съемки, изучение вероятных вариантов схемы классификации объектов, вариантов анализа и оптимизации сети.

Нейронная сеть обрабатывает изображение каждой из детектированных гипотез, связывая его с одной из категорий ТС. Проводится полное обнаружение и классификация транспортных средств. Однако для оценки метрик транспортного потока помимо выявления соответствия между транспортными средствами и участками дороги необходимо также определить направление, в котором транспортные средства движутся по дороге при двустороннем движении. С этой целью был разработан алгоритм, основанный на положении обнаруженного транспортного средства относительно осевой линии интерполированной модели дороги.

Производится определение, на какой половине дороги находится центральная точка минимального ограничивающего прямоугольника (BoundingBox) обнаруженного автомобиля. То есть при рассмотрении интерполированной цифровой модели перегона устанавливают, с какой стороны относительно ломаной цепочки отрезков перегона находится центральная точка ТС.

Для определения направления движения на участке дороги используются следующие обозначения. Направления движения нумеруются с нулевым индексом, если для каждой точки, лежащей на полосе перегона, выполняется соотношение:

$$x > x_o,$$

где x – абсцисса рассматриваемой точки; x_o – абсцисса точки основания перпендикуляра, проведенного от рассматриваемой точки к осевой линии интерполированной модели перегона (рис. 4).

Если соотношение не выполняется, индекс направления движения транспортного средства, находящегося на соответствующей полосе, равен 1.

Таким образом, алгоритм определения направления дорожного движения по BoundingBox ТС, включает в себя следующие этапы:

Шаг 1. Расчет координат центральной точки ТС:

$$\left(x_{bb} + \frac{w_{bb}}{2}; y_{bb} + \frac{h_{bb}}{2}\right),$$

где $(x_{bb}; y_{bb})$ – координаты BoundingBox ТС; w_{bb}, h_{bb} – ширина и высота BoundingBox ТС.

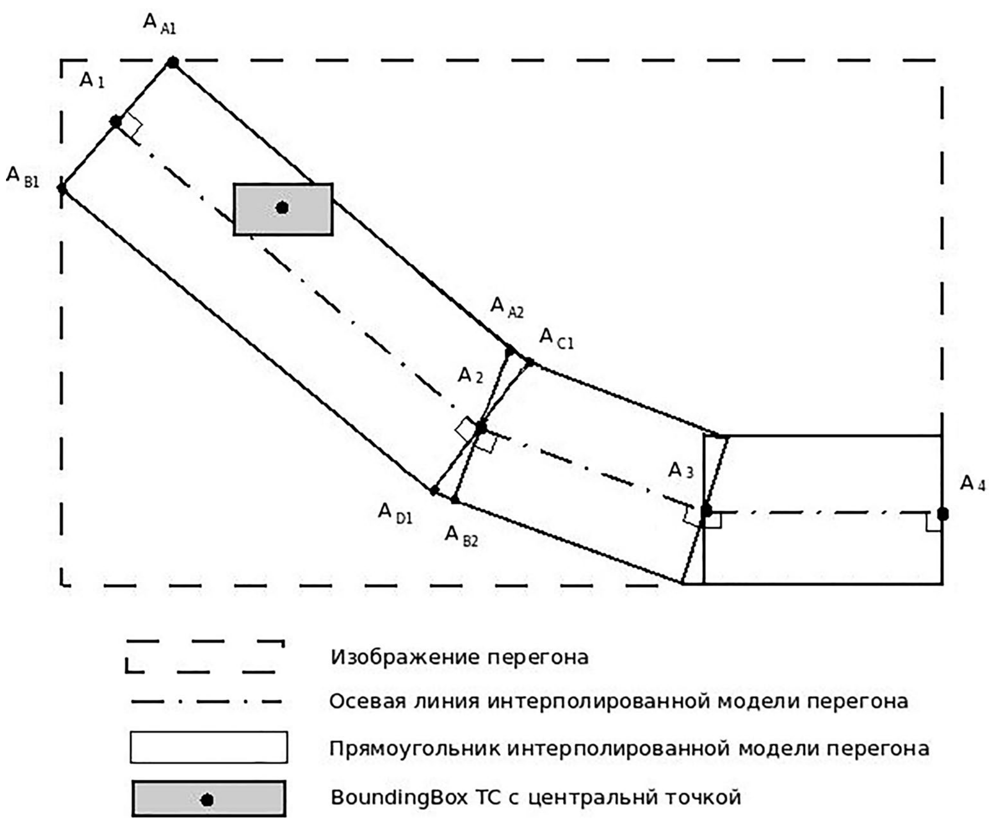


Рис. 4. Направление трафика, определяемое путем нахождения центральной точки гипотезы и ее положения по отношению к центральной линии интерполированной модели пролетов

Шаг 2. Нахождение перпендикуляра с минимальной длиной к одной из прямых, построенных на основе отрезков ломаной рассматриваемого перегона.

Шаг 3. Если неравенство верно, то это означает, что центральная точка находится по одну сторону от ломаной, и транспортное средство движется прямо. При нахождении центральной точки по другую сторону предполагается, что движение обратное. Для этого нужно найти отношение координат точки основания перпендикуляра и центральной точки ТС.

Выводы

Информация, собранная с орбитальных носителей в виде данных дистанционного зондирования (ДЗЗ), представляет собой всеобъемлющий и разнообразный источник знаний о наземных объектах [5–11]. Обнаружение и категоризация объектов в транспортном потоке, представленных на спутниковых снимках, является важнейшим аспектом решения проблемы интерпретации данных, полученных от систем ДЗЗ. Данная система исследований и разработок позволяет детектировать и классифицировать ТС на снимках с высоким пространственным разрешением, учитывая все описанные проблемы, возникающие при этом процессе.

Разрабатываемая алгоритмическая схема позволит производить численную оценку интенсивности и состава ТП по каждому перегону дорожной сети и может улучшить фактографическое обеспечение процессов транспортного планирования и повысить качество систем управления дорожным движением.

Мониторинг безопасности и организации дорожного движения будет проводиться чаще, чем предполагает «Порядок мониторинга дорожного движения» (утвержден приказом Минтранса России от 18 апреля 2019 г. № 114), поскольку предлагаемый метод оценивает состояние дорожного движения и его эффективность. Кроме того, он определяет и прогнозирует развитие процессов, влияющих на условия дорожного движения.

Решение задач формирования и развития транспортной инфраструктуры требует учета большого количества факторов, связанных с показателями технического развития города, ростом потребностей предприятий и населения, ресурсными возможностями. Требование учета временной динамики ресурсных ограничений совместно с динамикой специфики решаемых задач и потребностей в транспортных (дорожных) ресурсах приводит к объективной необходимости сформулировать научно обоснованный подход, позволяющий оптимизировать процессы совершенствования базовых магистральных транспортных связей на муниципальном уровне.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пугачев И.Н., Маркелов Г.Я., Тормозов В.С. Методика подсчета транспортных средств с использованием космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения // Вестн. ТОГУ. 2017. № 2 (45). С. 13–20.
2. Пугачев И.Н., Маркелов Г.Я., Тормозов В.С. Ускорение алгоритма детектирования транспортных средств на спутниковых снимках с помощью процедуры фильтрации гипотез // Вестн. Рос. нов. ун-та. Серия: Сложные системы: модели, анализ, управление. 2019. № . 1. С. 130–139.
3. Chen Ch., Минальд А.А., Богуш Р.П., Ma G., Weichen Y., Абламейко С.В. Обнаружение и классификация транспортных средств на снимках сверхвысокого разрешения с помощью нейронных сетей // Журн. прикл. спектроскопии. 2022. Т. 89. № 2. С. 275–282.
4. Пугачев И.Н., Маркелов Г.Я., Тормозов В.С. Обучение и использование сверточной нейронной сети для детектирования и классификации транспортных средств на спутниковых снимках сверхвысокого разрешения // Пром. АСУ и контроллеры. 2019. № 10. С. 20–25.
5. Головнин О.К. Системный анализ и моделирование объектов, процессов и явлений транспортной инфраструктуры в технических системах управления // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2018. Т. 20, № 6–2 (86). С. 301–310.

6. Бобырь М.В., Архипов А.Е., Якушев А.С., Бхаттачарья С. Построение карты глубины с использованием модернизированного фильтра Канни. Ч. 2 // Пром. АСУ и контроллеры. 2021. № 5. С. 3–15.

7. Пашаев М.Я. Управление системами транспортной логистики на основе ГЛОНАСС // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2017. № 3. С. 143–148.

8. Филиппова Н.А., Мушта Б.М., Сидоренко А.В. Анализ развития навигационной системы диспетчерского управления грузовым транспортом // Синергия наук. 2019. № 36. С. 734–751.

9. Исаева Е.И., Сорокин Е.А. Оценка эффективности от внедрения навигационных спутниковых технологий при перевозках в международном сообщении // Актуальные вопросы организации автомобильных перевозок, безопасности движения и эксплуатации транспортных средств: сб. науч. тр. по материалам XIV Междунар. науч.-техн. конф. Саратов, 2019. С. 97–104.

10. Петрова Е.А. Снижение издержек транспортного предприятия с помощью цифровых технологий // Проблемы совершенствования организации производства и управления промышленными предприятиями: межвуз. сб. науч. тр. Самара, 2021. № 1. С. 228–231.

11. Михеева Т.И., Головнин О.К., Федосеев А.А. Интеллектуальная геоинформационная платформа исследования транспортных процессов // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2017): сб. тр. III Междунар. конф. и молодежной школы / Самар. нац. исслед. ун-т им. акад. С.П. Королева. Самара, 2017. С. 753–761.

REFERENCES

1. Pugachev I.N., Markelov G. Ya., Tormozov V.S. Technique for counting vehicles using space images of ultra-high spatial resolution. *Bulletin of Pacific National University.* 2017;45(2):13–20. (In Russ.).

2. Pugachev I.N., Markelov G. Ya., Tormozov V.S. Acceleration of the vehicle detection algorithm on satellite images using the hypothesis filtering procedure. *Bulletin of the Russian New University. Series: Complex Systems: Models, Analysis, Control.* 2019;(1):130–139. (In Russ.).

3. Chen Ch., Minald A.A., Bogush R.P., Ma G., Weichen Y., Ablameiko S.V. Detection and classification of vehicles in ultra-high resolution images using neural networks. *Journal of Applied Spectroscopy.* 2022;89(2):275–282. (In Russ.).

4. Pugachev I.N., Markelov G. Ya., Tormozov V.S. Training and use of a convolutional neural network for the detection and classification of vehicles on ultra-high resolution satellite images. *Industrial ACS and Controllers.* 2019;(10):20–25. (In Russ.).

5. Golovnin O.K. System analysis and modeling of objects, processes and phenomena of transport infrastructure in technical control systems. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* 2018;20(6–2):301–310. (In Russ.).

6. Bobyr M.V., Arkhipov A.E., Yakushev A.S., Bhattacharya S. Building a depth map using the upgraded Canny filter. Part 2. *Industrial ACS and Controllers.* 2021;(5):3–15. (In Russ.).

7. Pashaev M. Ya. Management of transport logistics systems based on GLONASS. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Technology and Informatics*. 2017;(3):143–148. (In Russ.).

8. Filippova N.A., Mushta B.M., Sidorenko A.V. Analysis of the development of the navigation system of dispatch control of freight transport. *Synergy of Sciences.* 2019;(36):734–751. (In Russ.).

9. Isaeva E.I., Sorokin E.A. Evaluation of the effectiveness of the implementation of navigation satellite technologies for transportation in international traffic. In: *Topical Issues of the Organization of Road transport, Traffic Safety and Operation of Vehicles:* Collection of scientific papers based on the materials of the XIV International Scientific and Technical Conference. Saratov; 2019. P. 97–104. (In Russ.).

10. Petrova E.A. Reducing the costs of a transport enterprise with the help of digital technologies. In: *Problems of improving the organization of production and management of industrial enterprises*: Interuniversity collection of scientific papers. Samara; 2021. N1. P. 228–231. (In Russ.).

11. Mikheeva T.I., Golovnin O.K., Fedoseev A.A. Intelligent geoinformation platform for the study of transport processes. In: *Information technologies and nanotechnologies (ITNT-2017).* Proceedings of the III International Conference and Youth School. Samara; 2017. P. 753–761. (In Russ.).

Научная статья
УДК 553.411(571.61)
DOI: 10.31857/S0869769824020044
EDN: ldltdv

Геологическое и изотопное обоснование возраста оруденения Токурского золоторудного центра Приамурской провинции

В.А. Степанов✉, А.В. Мельников

Виталий Алексеевич Степанов
доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник
Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, Россия
vitstepanov@yandex.ru
http://orcid.org/0000-0002-7028-3662

Антон Владимирович Мельников
кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник
Институт геологии и природопользования ДВО РАН, Благовещенск, Россия
melnikov_anton1972@mail.ru
http://orcid.org/0000-0001-9102-653X

Аннотация. Проанализированы сведения о геологическом и изотопном возрасте формирования золотого оруденения Токурского золоторудного центра Приамурской золотоносной провинции. Показано, что добыча рудного золота велась главным образом из месторождений золото-сульфидной (Маломыр) и золотокварцевой формаций с альбититовыми (месторождения Албын и Эльга) и кварцево-жильными (Токур) рудами. Геологический и изотопный возраст указывает на раннемеловую эпоху формирования золотого оруденения Токурского центра. Изотопный возраст, определенный $^{40}Ar/^{39}Ar$ методом, позволяет выделить три этапа становления оруденения: ранний – золотокварцевый с альбититовыми рудами (139–130 млн лет), средний – золотосульфидный (134–120,7 млн лет) и поздний – золотокварцевый с кварцево-жильными рудами (122,4–113,6 млн лет).

Ключевые слова: золоторудный центр, месторождение, изотопный возраст, золотокварцевая и золотосульфидная формации

Для цитирования: Степанов В.А., Мельников А.В. Геологическое и изотопное обоснование возраста оруденения Токурского золоторудного центра Приамурской провинции // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 2. С. 42–53. http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020044, EDN: ldltdv

Original article

Geological and isotopic substantiation of the age of mineralization of the Tokur gold mining center of the Amur province

V.A. Stepanov, A.V. Melnikov

Vitaly A. Stepanov
Doctor of Sciences in Geology and Mineralogy, Professor, Chief Researcher
Research Geotechnological Center, FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
vitstepanov@yandex.ru
http://orcid.org/0000-0002-7028-3662

Anton V. Melnikov
Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Leading Researcher
Institute of Geology and Natural Management, FEB RAS, Blagoveshchensk, Russia
melnikov_anton1972@mail.ru
http://orcid.org/0000-0001-9102-653X

Abstract. Data on the geological and isotopic age of the formation of the gold mineralization of the Tokur gold ore center of the Amur gold-bearing province are analyzed. It is shown that the mining of ore gold was carried out mainly from deposits of gold-sulfide (Malomyr) and gold quartzformation with albitite (deposit (Albyn and Elga) and quartz-veined (Tokur) ores. The isotope age determined by the$^{40}Ar/^{39}Ar$ method makes it possible to distinguish three stages of the formation of mineralization: early – gold-quartz with albitite ores (139–130 million years), middle – gold-sulfide (134–120,7 million years) and late – gold-quartz with quartz-vein ores (122,4–113,6 million years).

Keywords: gold ore center, deposit, isotope age, gold-quartz and gold-sulfide formations

For citation: Stepanov V.A., Melnikov A.V. Geological and isotopic substantiation of the age of mineralization of the Tokur gold mining center of the Amur province. *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(2):42–53. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020044, EDN: ldltdv

Введение

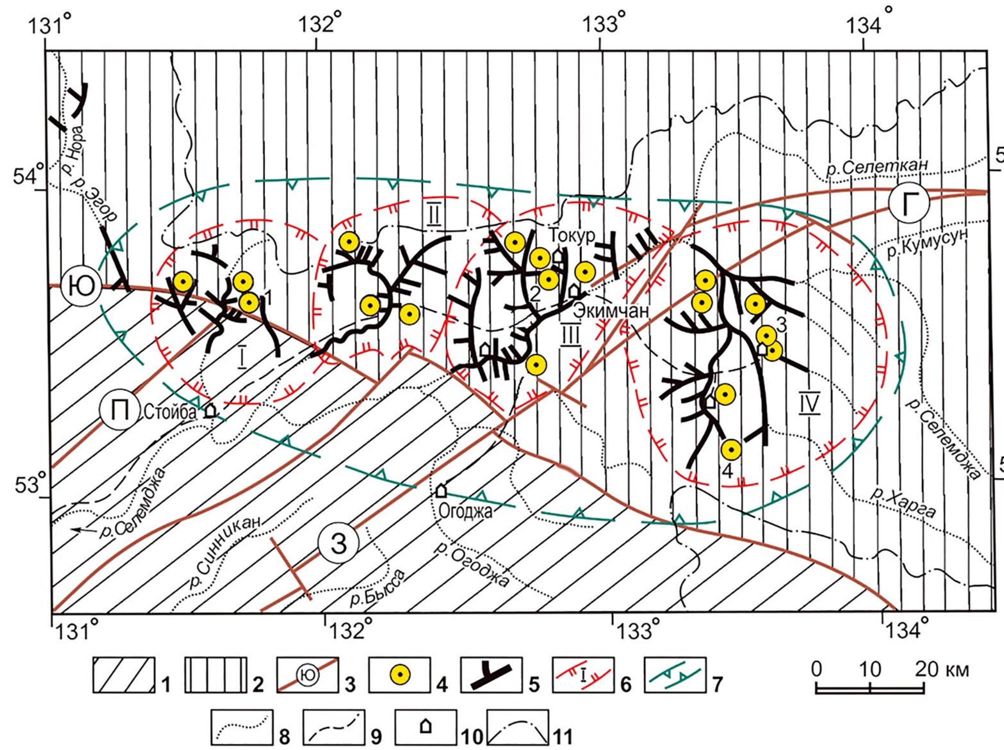
Золоторудные месторождения Приамурской провинции сосредоточены главным образом в центральной приядерной части Приамурской провинции. Наиболее продуктивные из них, с добычей рудного золота более 0,5 т, образуют три исторически сложившиеся агломерации, названные золоторудными центрами: Соловьевский, Гонжинский и Токурский. Из месторождений этих центров, занимающих незначительную часть площади провинции, добыто 99% всего ее рудного золота. Из месторождений Токурского центра извлечено на 01.01.2021 г. 127,2 т золота, что составляет 35% всего рудного золота провинции [1, 2]. В статье проанализированы сведения о геологическом и изотопном возрасте золотого оруденения Токурского центра.

Геолого-структурные особенности Токурского центра

Токурский золоторудный центр находится на восточном фланге Приамурской провинции, на площади Монголо-Охотского геоблока, ограниченного Южно-Тукурингрским и Северо-Тукурингрским региональными разломами. В пределах центра развиты в основном палеозойские образования, метаморфизованные в фации зеленых сланцев, прорванные интрузиями и дайками позднепалеозойского и мелового возраста. В металлогеническом плане центр представляет собой центральную часть Джагды-Селемджинской металлогенической зоны, вмещающую четыре рудно-россыпных узла (РРУ): Маломырский, Верхнестойбинский, Токурский и Харгинский (см. рисунок).

Маломырский РРУ представляет собой структуру центрального типа, приуроченную к пересечению Южно-Тукурингрского и Призейского разломов. Он сложен в основном вулканогенно-осадочными породами позднего палеозоя. Породы собраны в антиклинальную складку северо-западного простирания, в ядре которой расположены сланцы мынской свиты раннего карбона, а на крыльях златоустовской – среднего карбона. В южной части узла, вдоль Южно-Тукурингрского регионального разлома, располагается впадина, сложенная терригенными осадками моринской толщи среднеюрского возраста. На периферии узла находится серия интрузий гранодиорит-порфиров, гранит-порфиров и кварцевых диорит-порфиритов бурундинского комплекса нижнего–верхнего мела. Менее развиты небольшие интрузии кварцевых диорит-порфиритов меунского комплекса верхнего мела [3].

Восточнее расположено интрузивно-купольное поднятие Верхнестойбинского РРУ, сложенное вулканогенно-осадочными породами среднего и позднего палеозоя.



Токурский центр добычи рудного золота.
1 – Амурский геоблок, *2* – Монголо-Охотский геоблок, *3* – региональные разломы (Ю – Южно-Тукурингрский, П – Призейский, Г – Галамский, З – Западно-Туранский), *4* – золоторудные объекты: а – месторождения (1 – Осеннее, 2 – Кварцитовое, 3 – Маломыр, 4 – Поисковое, 5 – Ворошиловское, 6 – Сагур, 7 – Разведочное, 8 – Иннокентьевское, 9 – Токур, 10 – Тарнах, 11 – Ясное, 12 – Ингагли, 13 – Унгличикан, 14 – Албын, 15 – Харгинское, 16 – Афанасьевское, 17 – Эльгинское, 18 – Казанское), б – проявления, *5* – россыпи золота, *6* – границы рудно-россыпных узлов (I–Маломырский, II – Верхнестойбинский, III – Токурский, IV–Харгинский), *7* – контур Токурского золоторудного центра, *8* – водотоки, *9* – автодороги, *10* – населенные пункты, *11* – административная граница между Амурской областью и Хабаровским краем

Палеозойские толщи образуют куполовидную структуру, в ядре которой обнажены породы среднего девона, а на крыльях – среднего карбона и поздней перми. Залегающие выше песчаники, алевролиты, глинистые сланцы моринской толщи средней юры выполняют впадину вдоль Южно-Тукурингрского разлома. Центральная часть РРУ прорвана Ингаглинской интрузией гранитов и лейкогранитов позднепермского возраста. Из мезозойских интрузий встречаются мелкие изометричной формы штоки диоритов и диорит-порфиритов селитканского комплекса позднего мела, а также единичные интрузии андезитов бурундинского комплекса того же возраста.

Токурский узел представляет собой крупную синклинальную структуру, сложенную палеозойскими терригенными и вулканогенно-осадочными образованиями. Ядро ее представлено породами позднепермского, а крылья – средне-, верхнедевонского и среднекарбонового возраста. Палеозойский этап интрузивной деятельности начинается с внедрения мелких трещинных интрузий метагаббро и метагабббродиоритов златоустовского комплекса верхнего карбона. Затем в восточной части площади внедрился крупный интрузив, сложенный гранитами и лейкогранитами ингаглинского комплекса верхней перми. В ранне-позднемеловое время происходило образование мелких интрузий андезитов и дацитов бурундинского комплекса. В позднем мелу были сформированы небольшие интрузии риолитов и риодацитов баранчжинского комплекса, а затем гранодиоритов и диоритов селитканского комплекса.

Харгинский узел, расположенный на восточном фланге Токурского центра, представляет собой грабен-синклинальную структуру северо-восточного простирания, сложенную палеозойскими терригенными и вулканогенно-осадочными породами. Ядро структуры выполнено породами златоустовской свиты среднекарбонового возраста. Южное крыло представляют осадки талыминской свиты раннего карбона, а северное – среднедевонские породы акриндинской свиты. Синклиналь осложнена тремя выступами, или куполовидными поднятиями, раннепалеозойского фундамента, сложенного породами афанасьевской свиты. Палеозойский этап интрузивной деятельности начинается с внедрения в позднем карбоне трещинных и послойных интрузий метагаббро и метагаббродиоритов златоустовского комплекса. Затем появились плагиограниты и гранодиориты второй фазы того же комплекса, образующие небольшие интрузивы в южной части узла. Заканчивается палеозойский этап формированием в позднепермское время крупной Ингаглинской интрузии гранитов и лейкогранитов на западной окраине узла. Среди интрузий мезозойского возраста, ограниченно развитых в южной части узла, выделяются неправильной формы интрузия дацитов и риодацитов бурундинского комплекса нижнего–верхнего мела, шток гранодиоритов и диоритов селитканского комплекса верхнего мела и серия интрузий гранит-порфиров, гранодиорит-порфиров баджало-дуссеалинского комплекса верхнего мела.

Геологический и изотопный возраст продуктивных золоторудных месторождений Токурского центра

В Токурском центре наиболее продуктивными являются месторождения Албын, Токур и Маломыр с добычей в пределах 30–40 т золота, менее продуктивны Кварцитовое, Харга, Сагур, Ворошиловское и Эльга, из руд которых извлечены первые тонны золота. Ниже рассмотрен изотопный возраст месторождений Албын, Токур, Маломыр, а также разрабатываемого в настоящее время перспективного Эльга (см. таблицу). Они располагаются в западной (Маломыр), центральной (Токур) и восточной (Албын, Эльга) частях Токурского центра. Албын, Эльга и Токур отнесены к золотокварцевой формации, Маломыр – к золотосульфидной. Рудные тела представлены золотоносными залежами альбититовых метасоматитов (Албын, Эльга), зонами сульфидной вкрапленности (Маломыр) и кварцевыми жилами (Токур).

Золоторудные месторождения Токурского центра

	Добыча золота, т	Вмещающие породы	Изотопный ($^{40}Ar/^{39}Ar$) возраст золотого оруденения, млн лет	Источник
Золотокварцевая формация, зоны альбититов				
Албын	41,1	Сланцы афанасьевской свиты условно раннего карбона и метабазиты златоустовского комплекса условно позднего карбона	135 ± 2–131 ± 2	[4]
Эльга	2,3	Сланцы талыминской свиты нижнего–среднего карбона	139 ± 4–137 ± 3	[5]
Золотокварцевая формация, кварцево-жильный тип				
Токур	34,1	Породы токурской и экимчанской свит условно позднепермского возраста	113,6 122,4 ± 2,0	[6] [7]
Золотосульфидная формация				
Маломыр	32,2	Терригенные породы мынской и златоустовской свит карбона	120,7 ± 1,3 133 ± 2–132 ± 2 134 ± 3–130 ± 2	[8] [9] [10]

Золотокварцевая формация

Месторождение Албын расположено на восточном фланге Токурского золоторудного центра в пределах Харгинского РРУ. Вмещающими породами служат мусковит-кварц-альбитовые и мусковит-альбит-кварцевые сланцы афанасьевской свиты условно раннекаменноугольного возраста, а также метабазиты златоустовского комплекса, условно отнесенные к позднему карбону. Широко развиты дайки и малые тела риолитов, риодацитов и дацитов унериканского комплекса раннего мела, а также диоритовых порфиритов, гранодиорит-порфиров и гранит-порфиров позднемелового селитканского комплекса.

Рудные тела представлены пологонаклонными пласто-, ленто-, линзообразными этажно расположенными штокверковыми залежами, сложенными кварцполевошпатовыми, карбонат-слюдисто-кварц-альбитовыми, карбонат-хлоритслюдисто-кварц-альбитовыми, слюдисто-кварц-альбитовыми метасоматитами (альбититами). Содержание золота в рудных телах преимущественно низкое: в среднем в рудных телах центральной и западной частей рудной зоны – 2,2 г/т, восточной – 3,1 г/т.

Руды на 95–98% состоят из кварца и полевых шпатов с примесью слюдистых минералов, главным образом мусковита и серицита. Среди рудных минералов преобладают пирит и арсенопирит. Золото в основном свободное, иногда в сростках с кварцем и сульфидами, мелких, средних и крупных размеров. Проба золота месторождения Албын меняется в широких пределах от 760 до 912‰.

Нижняя возрастная граница золотого оруденения расплывчатая. Ее определяют сланцы афанасьевской свиты условно раннекаменноугольного возраста и метабазиты златоустовского комплекса условно позднекаменноугольного возраста, вмещающие основную массу рудных тел. Возраст пород афанасьевской свиты определен тем, что они согласно перекрываются терригенными породами талыминской свиты, охарактеризованными раннекаменноугольным спорово-пыльцевым комплексом. Метабазиты златоустовского комплекса прорывают отложения афанасьевской и талыминской свит раннекаменноугольного возраста и метаморфизованы совместно с ними в условиях зеленосланцевой фации [11].

Верхняя граница определена по позднемеловому возрасту пострудных даек диорит-порфиритов, гранодиорит-порфиров и гранит-порфиров селитканского комплекса. Они секут рудные тела и не несут признаков золотой минерализации. Кроме того, установлена парагенетическая связь золотого оруденения с дайками унериканского комплекса раннего мела. Золотоносные минерализованные зоны месторождения развиты преимущественно по контактам даек, подверженных метасоматическим изменениям [12].

Изотопный возраст мусковита из золотоносных метасоматитов оценен $^{40}Ar/^{39}Ar$ методом в Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск) [4] и составляет: для мусковита из мусковит-кварц-альбитового метасоматита рудного тела 1–131 ± 2 млн лет, для мусковита из мусковит-кварц-альбитового метасоматита рудного тела 2–135 ± 2 млн лет. Полученные данные свидетельствуют о том, что возраст гидротермального рудного процесса, приведшего к формированию месторождения Албын, 135–131 млн лет.

Месторождение Эльга располагается на юго-восточном фланге Токурского золоторудного центра в Харгинском РРУ. Вмещающими породами являются кварц-серицитовые, кварц-серицит-углеродистые, мусковит-кварц-альбитовые и актинолит-эпидот-хлорит-альбитовые сланцы талыминской свиты нижнего–среднего карбона. В районе месторождения развиты интрузии и субвулканические тела раннемелового андезит-риолитового унериканского комплекса и позднемелового диорит-гранодиорит-гранитового баджало-дуссеалинского комплекса, а также дайки диоритовых порфиритов ранне-позднемелового селитканского комплекса [5]. Характер взаимоотношения их с рудными телами не установлен.

Рудные тела мощностью 0,5–15 м сложены альбит-кварцевыми метасоматитами (альбититами) с прожилками кварца и вкрапленностью сульфидов. К основным нерудным минералам относятся кварц и альбит, встречаются серицит, адуляр, биотит, эпидот и актинолит. Содержание сульфидов в руде не превышает 5%. Среди них преобладают пирит и арсенопирит, реже встречаются галенит, сфалерит и халькопирит. Самородное золото образует вкрапленность в кварце и алюмосиликатной матрице, а также в сульфидах, преимущественно в арсенопирите.

Нижняя возрастная граница оруденения определяется вмещающими его сланцами талыминской свиты на основании находок спор и пыльцы, характерных для среднего карбона западнее района месторождения в бассейне р. Большой Наэрген [11]. Верхняя возрастная граница открыта, так как взаимоотношение известных в районе месторождения небольших интрузий и даек мелового возраста с оруденением не изучено.

$^{40}Ar/^{39}Ar$ геохронологические исследования проведены в Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск) методом ступенчатого прогрева [5]. В качестве анализируемого минерала использовался серицит из образцов метасоматитов и гидротермально-метасоматически измененных углеродсодержащих серицит-полевошпат-кварцевых сланцев с высокими концентрациями золота. Предполагается, что момент кристаллизации серицита из этих пород отвечает возрасту гидротермально-метасоматических золоторудных процессов, приведших к формированию Эльгинского месторождения, и находится в интервале 139 ± 4–137 ± 3 млн лет.

Месторождение Токур расположено в центральной части золоторудного центра, в пределах одноименного РРУ. Оно находится в поле развития песчано-глинистых отложений токурской и экимчанской свит предположительно позднепермского возраста, слагающих сводовую часть Челогорской антиклинали субширотного простирания [11]. Важным рудоконтролирующим элементом является субширотная зона Главного разлома, к узлу пересечения которого с поперечными сбросами приурочена центральная часть месторождения. Отмечаются многочисленные пострудные дайки диабазовых и диоритовых порфиритов, а также штоков кварцевых диоритов и кварцевых сиенит-порфиров [13].

Рудными телами являются золотоносные кварцевые жилы, имеющие брекчиевую, полосчатую и сетчатую структуру. Они сложены в основном кварцем, в меньшем количестве там находятся адуляр, кальцит, анкерит, серицит и хлорит. Из рудных минералов, количество которых не превышает 1–3%, присутствуют арсенопирит, пирит, галенит, сфалерит и самородное золото. Реже встречаются шеелит, рутил, халькопирит, марказит, блеклые руды, антимонит, кюстелит, станнин и касситерит. Золото свободное. Размеры его – от микронных выделений до мелких самородков, преобладают частицы от 0,02 до 0,2 мм. Проба золота колеблется в пределах от 600 до 800‰.

Нижнюю границу геологического возраста золотого оруденения определяют вмещающие терригенные породы токурской и согласно залегающей на ней экимчанской свит условно позднепермского возраста. Он определен по находкам растительного детрита, позволяющим считать эти отложения не древнее среднего палеозоя. Кроме того, в алевролитах экимчанской свиты обнаружены споры и пыльца не моложе средней юры, а в аллювии руч. Семертак, размывающего породы свиты, найдены обломки известняков с остатками криноидей, ругоз и мшанок, характеризующих возрастной интервал ордовик–пермь [11].

Верхнюю границу определяют пострудные дайки диабазовых и диоритовых порфиритов и штоки кварцевых диоритов и кварцевых сиенит-порфиров, отнесенные к караураксkому комплексу пород раннемелового возраста [14]. Диоритовые порфириты и диориты комплекса прорывают золоторудные кварцевые жилы месторождения. О близком возрасте пород комплекса и золоторудных тел свидетельствует наличие в интрузивных породах пострудных кварц-кальцитовых прожилков с пиритом. Раннемеловой возраст пород караураксkого комплекса определяется тем, что они интрудируют раннемеловые субвулканические породы унериканского комплекса и в свою очередь прорваны интрузиями позднемелового селитканского возраста. Изотопный возраст пострудных даек диоритовых и диабазовых порфиритов вначале был определен K-Ar методом в интервале 108–100 млн лет, что отвечает альбскому ярусу [6]. Более поздние исследования показали более широкий интервал (135–104 млн лет) изотопного возраста тех же даек, определенного K-Ar методом [14]. Кроме того, коллектив авторов предполагает парагенетическую связь формирования месторождения Токур с телом субвулканических трахириодацитов Караураксkого массива, для которого ранее U-Pb методом по цирконам был получен возраст 120 ± 5 млн лет [7].

Изотопный возраст золотого оруденения, определенный разными авторами, подтверждает его раннемеловой геологический возраст. Наиболее раннее определение возраста адуляр-кварцевого прожилка месторождения Токур произведено Ar-Ar методом в Аляскинском университете г. Фербенкс, США [6]. Оно составляет 113,6 ± 0,5 млн лет, что отвечает аптскому ярусу раннего мела. В той же работе изотопный возраст околорудных метасоматитов оценен K-Ar методом в интервале 133–112 млн лет. Более поздние геохронологические исследования адуляра из жилы Голубая месторождения Токур были выполнены $^{40}Ar/^{39}Ar$ методом в Институте геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск). Полученное значение возраста адуляра по плато составило 122,4 ± 2,0 млн лет (аптский ярус раннего мела). На основании сближенности во времени кристаллизации алудяра и самородного золота эта датировка рассматривается как возраст продуктивной стадии гидротермального рудного процесса на месторождении Токур [7].

Золотосульфидная формация

Месторождение Маломыр приурочено к западному флангу Токурского золоторудного центра. Площадь месторождения сложена терригенными образованиями мынской и златоустовской свит каменноугольного возраста. Широко развиты дайки диоритовых порфиритов и кварцевых диоритовых порфиритов караураксого комплекса раннемелового возраста [15]. По мнению детально изучавшего месторождение А.Е. Пересторонина, в его пределах широко развиты дайки и мелкие субвулканические тела андезитов, диоритовых порфиритов, гранодиорит-порфиров и андезибазальтов. Они содержат иногда убогую золотосеребряную минерализацию и являются пост- или синрудными [16]. А.Б. Лазарев отмечает, что пострудные дайки на месторождении Маломыр представлены в основном раннемеловыми андезитами и дацитами [17].

Основная часть золотого оруденения (около 94% запасов) локализована в пределах Диагональной тектонической зоны северо-восточного простирания. Рудные тела представлены зонами прожилково-вкрапленных руд. Руды сложены сульфидизированными брекчиями и катаклазитами кварц-альбитовых, серицит-кварцевых, кварц-адуляровых метасоматитов с наложенным прожилковым окварцеванием и вкрапленностью сульфидов. Из рудных минералов преобладают пирит и арсенопирит. В небольшом количестве отмечаются галенит, сфалерит, вольфрамит, шеелит, блеклые руды, гематит, магнетит, халькопирит, ильменит, рутил, марказит, станнин, касситерит, акантит, золото, молибденит и хромит. Основная масса руды содержит менее 2 г/т золота и относится к классу бедных. В ней преобладает «упорное», «невидимое» золото, которое заключено в тонковкрапленных сульфидах – пирите и игольчатом арсенопирите [18]. Небольшая часть золотин имеет размер десятые доли миллиметра. Проба золота составляет 781–880‰.

Нижнюю возрастную границу золотого оруденения определяют вмещающие терригенные отложения мынской и златоустовской свит каменноугольного возраста. Мынская свита условно раннекаменноугольного возраста сложена песчаниками, глинистыми и зелеными сланцами с прослоями известняков. В истоках р. Угохан мынская свита содержит обрывки стеблей каламитов и кордаитов, в том числе *Rufloria* sp. и *Cortex* sp., что свидетельствует о позднепалеозойском ее возрасте. Залегающая выше златоустовская свита состоит из глинистых сланцев, песчаников, зеленых сланцев и линз известняков. Среднекаменноугольный возраст ее принят условно [15].

Верхнюю возрастную границу определяют пострудные дайки раннего мела. По мнению А.Е. Пересторонина, некоторые из них могут быть синрудными ввиду наложения золотосеребряной минерализации [16].

Геохронологическими $^{40}Ar/^{39}Ar$ исследованиями установлено, что время формирования калиевого полевого шпата в рудах месторождения Маломыр составляет 131,8 ± 1,7 млн лет, а плагиоклаза – 120,7 ± 1,3 млн лет. Более древняя датировка характеризует дорудную стадию минерализации, а более молодая – рудную. Дорудная стадия отвечает готеривскому ярусу раннего мела, а рудная – аптскому ярусу [8].

Близкие определения изотопного возраста месторождения, проведенные $^{40}Ar/^{39}Ar$ методом в Институте геологии и минералогии СО РАН, опубликованы в работе [9]. Анализировались серицит и адуляр из кварц-серицитовых и кварц-серицит-адуляровых рудных метасоматитов месторождения. Возраст серицита из кварц-серицитового рудного метасоматита участка Кварцитовый составил 133 ± 2 млн лет. Возраст серицита из кварц-серицитового рудного метасоматита участка Маломыр – 132 ± 2 млн лет. Аналогичный возраст имеет адуляр из кварц-серицит-адулярового метасоматита. Полученные данные свидетельствуют о том, что возраст гидротермального рудного процесса, приведшего к формированию месторождения Маломыр может быть оценен в 133–132 млн лет.

В статье другого коллектива авторов изотопный возраст гидротермального рудного процесса, приведшего к формированию месторождения Маломыр, определен по серициту и адуляру из рудных метасоматитов $^{40}Ar/^{39}Ar$ методом в Институте геологии и минералогии СО РАН [10]. Он оценен в 134 ± 3–130 ± 2 млн лет, что также соответствует готеривскому ярусу раннего мела. В той же статье определен изотопный возраст пострудных даек андезибазальтов и базальтов бурундинского комплекса на участке Кварцитовый $^{40}Ar/^{39}Ar$ методом в Институте геологии и минералогии СО РАН. Он равен 110–104 млн лет (альбский ярус).

Обсуждение

Наблюдается определенная зональность в размещении типов продуктивного золотого оруденения в пределах Токурского золоторудного центра. На западном фланге основная добыча золота производилась в Маломырском РРУ из золотосульфидных руд месторождения Маломыр, в центральной зоне – из золотокварцевых жил месторождения Токур одноименного РРУ и на восточном – из зон альбититов месторождений Албын и Эльга Харгинского РРУ. О характерных отличиях типов золотого оруденения в пределах отдельных узлов свидетельствуют и особенности россыпного золота. На площади Маломырского узла, кроме одноименного месторождения, имеются золотосульфидные проявления. В связи с тем, что золотосульфидная формация не входит в число россыпных, то добыча из россыпей узла наименьшая среди РРУ центра (около 5 т). Золото в россыпях в основном тонких и мелких классов, проба 800–894‰. В отличие от Маломырского, в Токурском РРУ развиты в основном кварцево-жильные месторождения золотокварцевой формации (Токур, Иннокентьевское, Сагур, Тарнах и ряд проявлений). Из россыпей узла добыто около 60 т золота. Золото мелких и средних классов, встречаются самородки. Проба золота в россыпях ниже, колеблется в широких пределах: 715–870‰. Харгинский узел отличается преобладанием золотокварцевого оруденения в зонах альбититов (месторождения Албын, Эльга и ряд проявлений). Из россыпей узла добыто больше всего золота (около 83 т). Золото средних и мелких классов крупности, проба его колеблется в широких пределах: 705–950‰.

Геологический возраст дает представление о возрасте формирования золоторудных рудных тел рассматриваемых месторождений в широком возрастном диапазоне от позднего палеозоя вмещающих оруденение пород до раннемелового возраста пострудных или сопровождающих оруденение даек пестрого состава. Для месторождения Токур установлено наличие в дайках карауракского комплекса раннего мела пострудных кварц-кальцитовых прожилков с пиритом, что свидетельствует о близости времени формирования даек и золотого оруденения. Кроме того, K-Ar методом установлен раннемеловой возраст пострудных даек на месторождениях Токур и Маломыр. Это позволяет с достаточной долей уверенности определить раннемеловой возраст золотого оруденения Токурского центра.

Изотопный возраст золотого оруденения, в отличие от геологических данных, гораздо более точная характеристика, но относится ко времени кристаллизации рудосопровождающих минералов – серицита, калиевого полевого шпата и других, богатых калием минералов в основном из зон золотоносных метасоматитов. Лишь в случае Токурского месторождения адуляр и серицит отобраны из конкретных рудных тел, представленных золотокварцевыми жилами.

Изотопный возраст золотого оруденения определялся для всех месторождений одним и тем же $^{40}Ar/^{39}Ar$ методом, главным образом в Институте геологии и минералогии СО РАН, что важно для сравнения результатов анализов. Согласно определениям, изотопный возраст золотого оруденения Токурского центра растянут во времени от 139 до 113,6 млн лет, т.е. от валанжинского до аптского веков раннемеловой эпохи.

Различия изотопного возраста золотого оруденения разных формаций и типов рудных тел позволяют выделить три этапа золотого оруденения Токурского центра. Сначала формируется золотое оруденение, представленное кварц-альбит-серицитовыми альбититами (месторождение Эльга, 139–137 млн лет; Албын, 131–130 млн лет), затем образуются золотосульфидные руды месторождения Маломыр (134–120,7 млн лет), завершается этот процесс формированием кварцево-жильного месторождения Токур (122,4–113,6 млн лет). То есть наблюдается смена во времени формирования следующих типов золотого оруденения (от древних к молодым): золотоносные альбититы → золотосульфидные руды → золотокварцевые жилы.

Выводы

В результате анализа геологического и изотопного возраста золотого оруденения Токурского золоторудного центра установлено следующее:

геологические данные указывают на широкий возрастной диапазон формирования золоторудных месторождений от позднего палеозоя вмещающих оруденение пород до раннемелового возраста пострудных даек пестрого состава. Признаки парагенетической связи оруденения месторождений Токур и Албын с раннемеловыми дайками свидетельствуют о вероятном раннемеловом возрасте оруденения;

согласно геохронологическим исследованиям, возраст золотого оруденения Токурского центра является раннемеловым и растянут во времени от 139 до 113,6 млн лет, т.е. от валанжинского до аптского веков. Наблюдается смена во времени формирования разных типов золотого оруденения (от древних к молодым): золотоносные альбититы (139–130 млн лет) → золотосульфидные руды (134–120,7 млн лет) → золотокварцевые жилы (122,4–113,6 млн лет).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Степанов В.А., Мельников А.В. Исторические центры добычи рудного золота в Приамурской провинции // Разведка и охрана недр. 2021. № 12. С. 15–23.

2. Степанов В.А., Мельников А.В. Токурский золоторудный центр Приамурской золотоносной провинции // Региональная геология и металлогения. 2022. № 90. С. 107–116.

3. Мельников А.В., Степанов В.А. Рудно-россыпные узлы Приамурской золотоносной провинции. Ч. 2. Центральная часть провинции. Благовещенск: АмГУ, 2014. 300 с.

4. Кадашникова А.Ю., Сорокин А.А., Пономарчук А.В. и др. $^{40}Ar/^{39}Ar$ возраст золотого оруденения месторождения Албын (восточная часть Монголо-Охотского складчатого пояса // Докл. РАН. 2019. Т. 485, № 4. С. 468–473.

5. Кадашникова А.Ю., Сорокин А.А., Пономарчук А.В. и др. Возраст золотого оруденения месторождения Эльгинское (Монголо-Охотский складчатый пояс): $^{40}Ar/^{39}Ar$ геохронологические ограничения // Тихоокеанская геология. 2022. Т. 41, № 2. С. 89–100.

6. Фатьянов И.И., Лэйер П. О времени формирования золоторудного месторождения Токур // Геология и минеральные ресурсы Амурской области. Благовещенск: АмурКНИИ, 1995. С. 217–219.

7. Сорокин А.А., Остапенко Н.С., Пономарчук В.А. и др. Возраст адуляра из жил золоторудного месторождения Токур (Монголо-Охотский орогенный пояс, Россия): результаты датирования $^{40}Ar/^{39}Ar$ методом // Геология руд. месторождений. 2011. Т. 53, № 3. С. 297–304.

8. Бучко И.В., Пономарчук А.В., Травин А.В. Возраст метасоматитов золоторудного месторождения Маломыр // Золото северного обрамления Пацифики. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2011. С. 66–68.

9. Сорокин А.А., Пономарчук А.В., Бучко И.В. и др. $^{40}Ar/^{39}Ar$ возраст золотого оруденения месторождения Маломыр (восточная часть Монголо-Охотского складчатого пояса) // Докл. РАН. 2016. Т. 466, № 2. С. 207–212.

10. Кадашникова А.Ю., Сорокин А.А., Пономарчук В.А. и др. Закономерности локализации оруденения, возраст и источники вещества золоторудного месторождения Маломыр (восточная часть Монголо-Охотского складчатого пояса) // Геология руд. месторождений. 2019. Т. 61, № 1. С. 3–17.

11. Забродин В.Ю., Бородин А.М., Гурьянов В.А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1: 1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист N-53 – Шантарские острова. Объяснительная записка. СПб: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2007. 450 с.

12. Пересторонин А.Е., Степанов В.А. Золоторудное месторождение Албын Приамурской провинции // Известия вузов. Геология и разведка. 2015. № 4. С. 22–29.

13. Эйриш Л.В. Металлогения золота Приамурья (Амурская область, Россия). Владивосток: Дальнаука. 2002. 194 с.

14. Агафоненко С.Г., Сережников А.Н., Усов И.О. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Лист N-53-XXV. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2019. 143 с.

15. Сережников А.Н. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Лист N-52. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 330 с.

16. Пересторонин А.Е. Золотосульфидные месторождения Приамурья: Геологическое строение, закономерности размещения и состав руд: автореф. дис. … канд. геол.-минер. наук. Благовещенск, 2005. 26 с.

17. Лазарев А.Б., Волков А.В., Сидоров А.А. Рудовмещающие дуплексы золоторудного орогенного месторождения Маломыр (Приамурье) // Геология руд. месторождений. 2012. Т. 54, № 6. С. 513–522.

18. Золоторудные месторождения России / под ред. М.М. Константинова. М.: Акварель, 2010. 358 с.

REFERENCES

1. Stepanov V.A., Mel′nikov A.V. Istoricheskie centry dobychi rudnogo zolota v Priamurskoi provincii. *Razvedka i ohrana nedr*. 2021;(12):15–23. (In Russ.).

2. Stepanov V.A., Mel′nikov A.V. Tokurskii zolotorudnyi centr Priamurskoi zolotonosnoi provintsii. *Regional′naya geologiya i metallogeniya*. 2022;(90):107–116. (In Russ.).

3. Mel′nikov A.V., Stepanov V.A. Rudno-rossypnye uzly Priamurskoi zolotonosnoi provintsii. Chast′ 2. Central′naya chast′ provintsii. Blagoveshhensk: AmGU; 2014. 300 s.

4. Kadashnikova A. Yu., Sorokin A.A., Ponomarchuk A.V. i dr. $^{40}Ar/^{39}Ar$ vozrast zolotogo orudeneniya mestorozhdeniya Albyn (vostochnaya chast′ Mongolo-Oxotskogo skladchatogo poyasa. *Doklady RAN*. 2019;485(4):468–473. (In Russ.).

5. Kadashnikova A. Yu., Sorokin A.A., Ponomarchuk A.V. i dr. Vozrast zolotogo orudeneniya mestorozhdeniya El′ginskoe (Mongolo-Oxotskii skladchatyi poyas): $^{40}Ar/^{39}Ar$ geoxronologicheskie ogranicheniya. *Tihookeanskaya geologiya*. 2022;41(2):89–100. (In Russ.).

6. Fat′yanov I.I., Leier P. O vremeni formirovaniya zolotorudnogo mestorozhdeniya Tokur. In: *Geologiya i mineral′nye resursy Amurskoi oblasti.* Blagoveshhensk: AmurKNII; 1995. S. 217–219. (In Russ.).

7. Sorokin A.A., Ostapenko N.S., Ponomarchuk V.A. i dr. Vozrast adulyara iz zhil zolotorudnogo mestorozhdeniya Tokur (Mongolo-Ohotskii orogennyi poyas, Rossiya): rezul′taty datirovaniya $^{40}Ar/^{39}Ar$ metodom. *Geologiya rudnyh mestorozhdenii*. 2011;53(3):297–304. (In Russ.).

8. Buchko I.V., Ponomarchuk A.V., Travin A.V. Vozrast metasomatitov zolotorudnogo mestorozhdeniya Malomyr. In: *Zoloto severnogo obramleniya Patsifiki*. Magadan: SVKNII DVO RAN; 2011. S. 66–68. (In Russ.).

9. Sorokin A.A., Ponomarchuk A.V., Buchko I.V. i dr. $^{40}Ar/^{39}Ar$ vozrast zolotogo orudeneniya mestorozhdeniya Malomyr (vostochnaya chast′ Mongolo-Ohotskogo skladchatogo poyasa). *Doklady RAN*. 2016;466(2):207–212. (In Russ.).

10. Kadashnikova A. Yu., Sorokin A.A., Ponomarchuk V.A. i dr. Zakonomernosti lokalizatsii orudeneniya, vozrast i istochniki veschestva zolotorudnogo mestorozhdeniya Malomyr (vostochnaya chast′ Mongolo-Ohotskogo skladchatogo poyasa). *Geologiya rudnyh mestorozhdenii.* 2019;61(1):3–17. (In Russ.).

11. Zabrodin V. Yu., Borodin A.M., Gur′yanov V.A. i dr. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii masshtaba 1: 1 000 000 (tret′e pokolenie). Seriya Dal′nevostochnaya. List N-53 – Shantarskie ostrova. Ob′yasnitel′naya zapiska. SPb: Kartfabrika VSEGEI; 2007. 450 s. (In Russ.).

12. Perestoronin A.E., Stepanov V.A. Zolotorudnoe mestorozhdenie Albyn Priamurskoi provintsii. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*. 2015;(4):22–29. (In Russ.).

13. Eirish L.V. Metallogeniya zolota Priamur′ya (Amurskaya oblast′, Rossiya). Vladivostok: Dal′nauka; 2002. 194 s. (In Russ.).

14. Agafonenko S.G., Serezhnikov A.N., Usov I.O. i dr. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoi Federatsii masshtaba 1: 200 000. List N-53-XXV. Ob′yasnitel′naya zapiska. SPb.: VSEGEI; 2019. 143 s. (In Russ.).

15. Serezhnikov A.N. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoi Federatsii masshtaba 1: 1000000. List N-52. Ob′yasnitel′naya zapiska. SPb.: VSEGEI; 2007. 330 s. (In Russ.).
16. Perestoronin A.E. Zolotosul′fidny′e mestorozhdeniya Priamur′ya: Geologicheskoe stroenie, zakonomernosti razmeshheniya i sostav rud: Avtoref. dis. … kand. geol.-miner. nauk. Blagoveshhensk, 2005. 26 s. (In Russ.).
17. Lazarev A.B., Volkov A.V., Sidorov A.A. Rudovmeshchayushhie dupleksy zolotorudnogo orogennogo mestorozhdeniya Malomyr (Priamur′e). *Geologiya rudnih mestorozhdenii*. 2012;54(6):513–522. (In Russ.).
18. Konstantinova M.M. Zolotorudnye mestorozhdeniya Rossii. M.: Akvarel′; 2010. 358 s. (In Russ.).

Научная статья
УДК 531:550.3
DOI: 10.31857/S0869769824020053
EDN: ldlrve

Тектонические деформации в вулканическом поясе Курило-Камчатской дуги перед землетрясениями с M~7,0 в зоне субдукции

В.М. Ившин

Владимир Максимович Ившин
пенсионер
Московская область, Протвино, Россия
vladimir.m.ivshin@gmail.com

Аннотация. В настоящей статье рассматриваются градиенты смещения в поверхностном слое Земли, создаваемые весом вышележащих горных пород, и градиент смещения в поверхностном скальном массиве, возникающий под действием тектонических сил перед землетрясением в зоне субдукции. Делается оценка величины деформаций перед землетрясениями с M ~ 7,0.

Ключевые слова: рыхлые отложения, скальный массив, градиент смещения, тектонические деформации, тектоническое давление, геомеханический датчик, вулканический пояс, очаг землетрясения, зона субдукции

Для цитирования: Ившин В.М. Тектонические деформации в вулканическом поясе Курило-Камчатской дуги перед землетрясениями с M ~ 7,0 в зоне субдукции // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 2. С. 54–61. http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020053, EDN: ldlrve

Original article

Tectonic deformations in the volcanic belt of Kurilo-Kamchatsky arc before earthquakes with M~7,0 in zone subduction

V.M. Ivshin

Vladimir M. Ivshin
pensioner
Moscow Region, Protvino, Russia
vladimir.m.ivshin@gmail.com

Abstract. In the article is performed estimate of the value deformations, incipient in the surface rocky massif of volcanic belt of Kurilo-Kamchatsky arc before earthquakes with M ~ 7,0 in zone subduction.

***Keywords**:* loose sediments, rocky massif, gradient of displacemen, tectonic deformations, tectonic pressure, geomechanical sensor, volcanic belt, earthquake focus, zone subduction

For citation: Ivshin V.M. Tectonic deformations in the volcanic belt of Kurilo-Kamchatsky arc before earthquakes with M ~ 7,0 in zone subduction. *Vestnik of the FEB RAS.* 2024;(2):54–61. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020053, EDN: ldlrve

Введение

При многолетних светодальномерных наблюдениях на Камчатке не было обнаружено значимых тектонических деформаций, предваряющих землетрясения.

Это обстоятельство дало основания для предположения, что в вулканическом поясе Курило-Камчатской дуги тектонические деформации, обусловленные землетрясениями в акватории Тихого океана, малы.

Для проверки указанного предположения были проведены геомеханические исследования. В предлагаемой статье обсуждаются данные исследования и делается оценка величины тектонических деформаций в вулканическом поясе перед землетрясением с M ~ 7,0 в Авачинском заливе.

1. Градиенты смещения в поверхностном слое Земли, создаваемые весом вышележащих горных пород

1.1. Исходные представления

Поверхностный слой Земли испытывает давление вышележащих горных пород. Так как время релаксации данного слоя существенно меньше времени действия внешних сил, его можно рассматривать как вязкую жидкость. Вблизи земной поверхности вязкость указанного слоя с ростом глубины увеличивается в разы [1]. На основании этого можно утверждать, что в поверхностном слое под действием веса вышележащих горных пород возникает медленно меняющийся во времени градиент смещения. Оценим его величину в некоторой точке. Представляется естественным считать, что горизонтальное смещение u является линейной функцией времени. При этом очевидно, что оно будет тем значительнее, чем больше давление горных пород p и чем меньше их вязкость λ. Отсюда имеем:

$$u = \xi \frac{p}{\lambda} t, \tag{1.1}$$

где ξ – коэффициент пропорциональности.

Поскольку p и λ зависят от глубины z, получим

$$\frac{du}{dz} = \left(\frac{dp}{dz} - \frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{dz} p \right) \frac{\xi}{\lambda} t. \tag{1.2}$$

В рыхлых отложениях коэффициент вязкости относительно мал, поэтому можно ожидать выполнение неравенства:

$$\frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{dz} p \gg \frac{dp}{dz}. \tag{1.3}$$

Из (1.2) и (1.3) следует, что в поверхностном слое рыхлых отложений

$$\frac{du}{dz} \approx -\frac{\xi}{\lambda^2}\frac{d\lambda}{dz}pt. \tag{1.4}$$

В скальном массиве коэффициент вязкости очень большой. В нем может быть справедливо неравенство:

$$\frac{1}{\lambda}\frac{d\lambda}{dz}p \ll \frac{dp}{dz}. \tag{1.5}$$

Из (1.2) и (1.5) следует, что в поверхностном слое скального массива

$$\frac{du}{dz} \approx \frac{\xi}{\lambda}\frac{dp}{dz}t. \tag{1.6}$$

1.2. Результаты наблюдений

Для доказательства справедливости соотношений (1.4) и (1.6) на Камчатке были выполнены наблюдения с помощью геомеханических датчиков. Датчики представляют собой прочно связанные со средой на глубине 50 м вертикальные гильзы длиной 2 м с внутренним диаметром ≥20 см, в которых для преобразования механического сигнала в электрический закреплены скважинные уровневые электролитические наклономеры модели НИВ-1 длиной 1 м [2].

Из соотношений (1.4) и (1.6) следует, что горизонтальное смещение *u,* создаваемое весом вышележащих горных пород в поверхностном слое рыхлых отложений с глубиной уменьшается, а в поверхностном слое скального массива – увеличивается. Чтобы на опыте убедиться, что происходит именно так на глубине 50 м, необходимо и в рыхлых отложениях, и в скальном массиве на указанной глубине определить направление движения верхней части датчика относительно основания и сопоставить его с направлением, куда вмещающая среда имеет возможность смещаться.

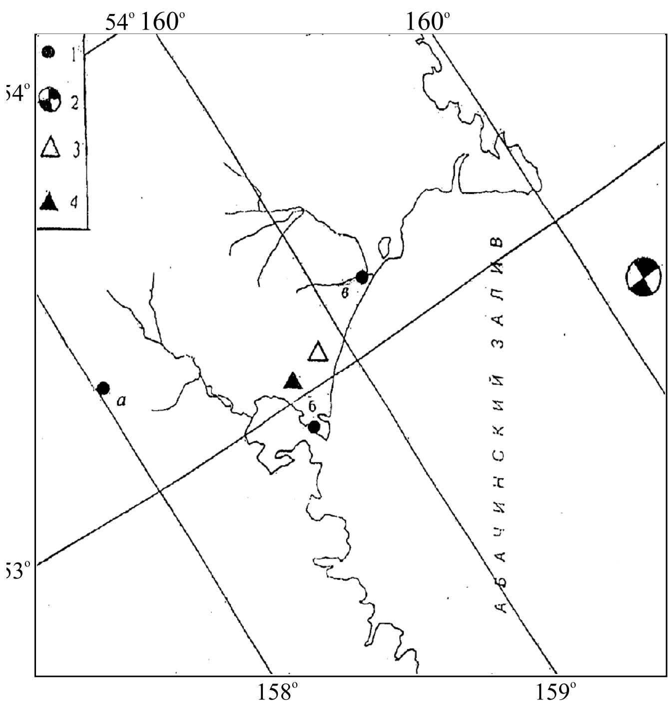


Рис. 1. Карта-схема района геомеханических исследований на Камчатке. *1* – геомеханические датчики, созданные: а – в долине р. Тополовая, б – на утесе Авачинской бухты, в – в устье р. Налычева; *2* – эпицентр землетрясения в Авачинском заливе 02.03.1992 г. с М = 7,1; *3* – геомеханический датчик на горе Толстый Мыс; 4 – геомеханический датчик на сопке Петровская

Геомеханические датчики были созданы в долине р. Тополовая и на утесе Авачинской бухты (рис. 1). Поверхностный слой в районе тополовского датчика – рыхлые отложения, а в районе авачинского датчика – скальный массив. Полученные на дат-

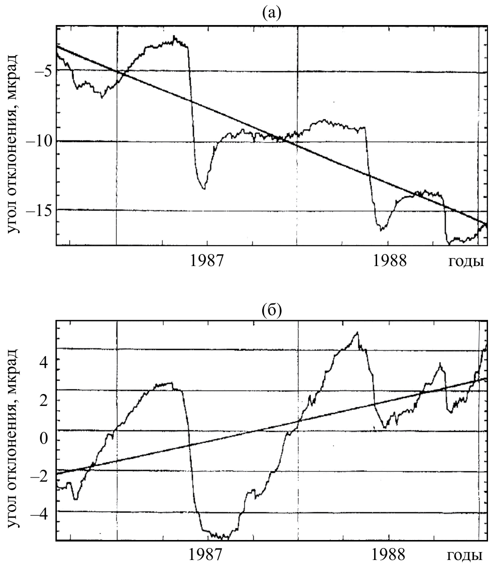


Рис. 2. Временные ряды углов отклонения продольной оси геомеханического датчика от отвесной линии и их линейные тренды в направлениях С–Ю (а) и З–В (б), характеризующие градиент смещения, создаваемый весом вышележащих пород в долине р. Тополовая

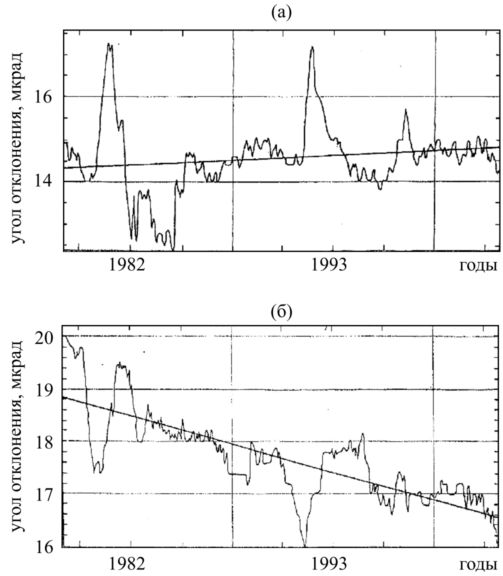


Рис. 3. Временные ряды углов отклонения продольной оси геомеханического датчика от отвесной линии и их линейные тренды в направлениях С–Ю (а) и З–В (б), характеризующие градиент смещения, создаваемый весом вышележащих горных пород на утесе Авачинской бухты

чиках временные ряды показаны на рис. 2 и 3, на которых горизонтальные оси – оси времени, а вертикальные – оси углов отклонения датчиков от отвесной линии в направлении С–Ю и З–В. Увеличение рядов означает, что верхняя часть датчиков относительно основания в направлении С–Ю движется на юг, а в направлении З–В – на запад.

Наблюдения на тополовском датчике начались в сентябре 1986 г., а закончились в январе 1989 г. Временные ряды этого датчика приведены на рис. 2. На этом рисунке изображены также линейные тренды, которые были выделены из рядов методом наименьших квадратов. Видно, что тренд в направлении С–Ю уменьшается, а в направлении З–В – увеличивается. Значит, верхняя часть датчика относительно основания медленно двигалась на север и запад. Вмещающая среда в районе датчика может смещаться на север и запад, т. е. направление движения верхней части датчика совпадало с направлением смещения вмещающей среды. Таким образом, наблюдения на тополовском датчике свидетельствуют о том, что скорость горизонтального смещения среды в рыхлых отложениях на глубине 50 м с глубиной уменьшается.

Геомеханические наблюдения на утесе Авачинской бухты проводились с марта 1992 г. по апрель 1994 г. Временные ряды авачинского датчика и их линейные тренды приведены на рис. 3. Линейный тренд в направлении С–Ю увеличивается, а в направлении З–В – уменьшается. Следовательно, верхняя часть датчика относительно основания двигалась на юг и восток. Вмещающая среда на утесе Авачинской бухты в районе датчика имеет возможность смещаться на север и запад, т. е. направление движения верхней части Авачинского датчика было противоположно направлению смещения вмещающей среды. А это означает, что скорость горизонтального смещения среды в скальном массиве на глубине 50 м с глубиной увеличивается.

На рис. 2 и 3 видно, что градиенты смещения испытывают сильные колебания. Они не могли быть вызваны атмосферным давлением. Температура также не могла вызвать эти колебания. Температура на глубине 50 м практически постоянна. Например, на Камчатке, как показали наблюдения, температура на указанной глубине равна +4 °С, и изменяется она в течение года меньше чем на 0,1 °С.

Покажем, что наблюдаемые колебания градиентов смещения вызваны изменением уровня грунтовых вод. Скорость движения грунтовых вод весьма мала, так что скоростным напором можно пренебречь. В этом случае сила dF, с которой поток грунтовых вод действует на направленный вдоль него элемент поверхностного слоя длиной dl и площадью поперечного сечения ds, описывается соотношением:

$$dF = -\gamma_0 dHds,$$

где dH – разность пьезометрических напоров для крайних сечений элемента поверхностного слоя, γ_0 – удельный вес воды.

Гидродинамическое давление p_∂ определяется при делении силы dF на объем рассматриваемого элемента:

$$p_\partial = \frac{dF}{dsdl} = -\frac{\gamma_0 dHds}{dsdl} = -\gamma_0 \frac{dH}{dl}. \tag{1.7}$$

Пьезометрический напор H в некоторой точке грунтового потока можно представить в виде суммы среднего за год напора H_0 и сезонно меняющегося напора ΔH. Имеем

$$H = H_0 + \Delta H = H_0\left(1 + \frac{\Delta H}{H_0}\right). \tag{1.8}$$

На основании (1.7) и (1.8) получаем

$$p_\partial = -\gamma_0 \frac{d}{dl} H_0\left(1 + \frac{\Delta H}{H_0}\right). \tag{1.9}$$

Из соотношения (1.9) следует, что чем меньше $\Delta H / H_0$, тем меньше временные изменения гидродинамического давления p_∂.

Чтобы убедиться в этом, был создан геомеханический датчик в устье р. Налычева, где уровень грунтовых вод меняется мало (рис. 1). На рис. 4 показаны временные ряды, которые были получены на налычевском датчике в период с ноября 1992 г. по апрель 1994 г., и их линейные тренды. Назначение осей на рисунке и связь изменения рядов с движением верхней части датчика те же, что на рис. 2 и 3.

Среднеквадратичные отклонения рядов от линейных трендов не превышают ошибки измерения. А это значит, что колебания градиентов смещения на рис. 2 и 3 вызваны грунтовыми водами.

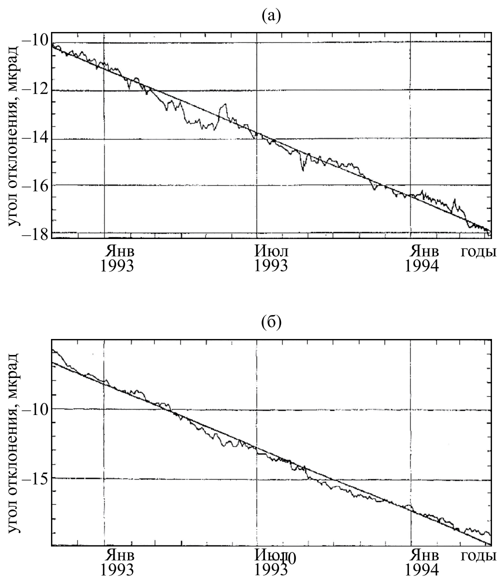


Рис. 4. Временные ряды углов отклонения продольной оси геомеханического датчика от отвесной линии и их линейные тренды в направлениях С–Ю (а) и З–В (б), характеризующие градиент смещения, создаваемый весом вышележащих горных пород в устье р. Налычева

2. Градиент смещения в поверхностном скальном массиве вулканического пояса Курило-Камчатской дуги, возникающий перед сильным землетрясением в зоне субдукции

2.1. Исходные представления

Перед землетрясением в зоне субдукции фронтальная часть Курило-Камчатской дуги, расположенная между вулканическим поясом и субдуцирующей Тихоокеанской плитой, под нагрузкой океанской плиты изгибается на вулканическом поясе как на упругом основании [3]. Вследствие этого в вулканическом поясе в поверхностном скальном массиве создается напряженное состояние, которое в системе координат XYZ (ось Z – вертикальна) характеризуют соотношения [4]:

$$\sigma_x = \lambda\Delta + 2G\varepsilon_x, \sigma_y = \lambda\Delta + 2G\varepsilon_y, \sigma_z = \lambda\Delta + 2 = G\varepsilon_z. \tag{2.1}$$

Здесь σ – напряжение, ε – деформация, $\Delta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ – объемная деформация. Коэффициенты λ и G:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, G = \frac{E}{2(1+\nu)},$$

где E – модуль Юнга, v – коэффициент Пуассона.

Около земной поверхности напряжения (2.1) из-за невозможности бокового расширения вызывают одноосную деформацию вдоль некоторой оси X. Из (2.1) имеем

$$\sigma_x = (\lambda + 2G)\varepsilon_x, \sigma_y = \lambda\varepsilon_x, \sigma_z = \lambda\varepsilon_x. \tag{2.2}$$

На основании (2.2) получаем

$$\varepsilon_x = \frac{p}{K}, \tag{2.3}$$

где $p = \left(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z\right) / 3$ – тектоническое давление, $K = (3\lambda + 2G) / 3 = E / 3(1 - 2v)$ – объемный модуль.

При появлении тектонического давления (2.3) скальный массив под некоторой горой деформируется. В результате этого на участке деформирования l от проекции вершины горы до проекции подножия горы на глубине 50 м происходит смещение:

$$u_x = \int_0^l \varepsilon_x dx = \int_0^l \frac{p}{K} dx = \frac{\overline{p}}{\overline{K}} l, \tag{2.4}$$

где $\overline{p}$ и $\overline{K}$ – средние на отрезке l значения давления p и объемного модуля K.

Рассматриваемый скальный массив мощностью 50 м сложен трещиноватыми горными породами. Под действием веса вышележащих пород трещиноватость массива с ростом глубины уменьшается, вследствие чего его модуль упругости $\overline{K}$ увеличивается в разы [1]. Так как при этом $\overline{p}$ вблизи земной поверхности практически не меняется, то при смещении u_x возникает градиент смещения:

$$\frac{du_x}{dz} = -\frac{\overline{p}}{\overline{K}^2} \frac{d\overline{K}}{dz} l. \tag{2.5}$$

2.2. Результаты наблюдений

Из (1.6) следует, что градиент смещения, возникающий в поверхностном скальном массиве под действием веса вышележащих горных пород, не зависит от давления. Поэтому, как видно из (2.5), наблюдения за градиентом смещения в скальном массиве позволят обнаружить появление тектонического давления $\overline{p}$. Правда, это можно реализовать практически, только если l не является малой ве-

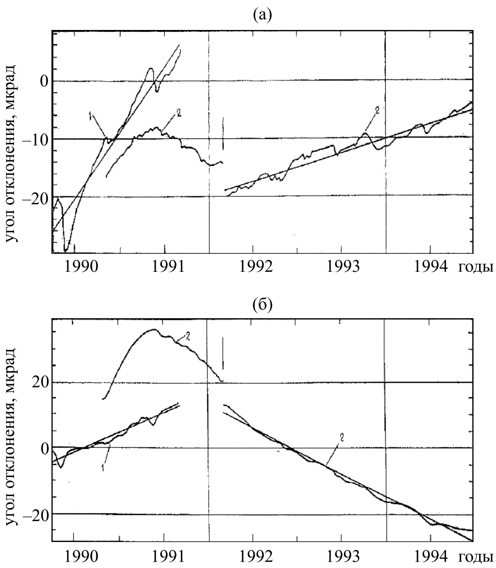


Рис. 5. Временные ряды углов отклонения продольной оси геомеханического датчика от отвесной линии в направлениях С–Ю (а) и З–В (б), характеризующие изменение вертикального градиента горизонтального смещения на горе Толстый Мыс (*1*) и сопке Петровская (*2*). Стрелкой указан момент землетрясения 2 марта 1992 г. с $M = 7{,}1$

личиной. Чтобы на опыте проверить справедливость данных утверждений, на Камчатке были проведены наблюдения с помощью двух геомеханических датчиков (рис. 1). Один датчик размещался в скальном массиве у подножия Петровской сопки высотой 468 м на расстоянии примерно 1 км от ее вершины, второй датчик – в скальном массиве на горе Толстый Мыс высотой 249 м вблизи ее вершины. На Петровской сопке датчик был установлен там, где под действием веса вышележащих пород его сигнал в направлении С–Ю увеличивается, а в направлении З–В уменьшается. Рост тектонического давления должен был вызывать в общем случае нелинейное увеличение сигнала датчика и в направлении С–Ю, и в направлении З–В, а падение давления – нелинейное уменьшение сигналов датчика в указанных направлениях. На горе Толстый Мыс датчик был установлен там, где под действием веса вышележащих пород его сигналы увеличивались и в направлении С–Ю, и в направлении З–В. На рост и падение тектонического давления он должен был реагировать так же, как и датчик на Петровской сопке.

В период наблюдения на созданных датчиках, а именно 2 марта 1992 г., в Авачинском заливе на расстоянии около 100 км от датчиков произошло сильное землетрясение с $M = 7{,}1$ ($\varphi = 52{,}76$°N, $\lambda = 160{,}20$°E, $h = 20$ км) [5]. Полученные временные ряды (рис. 5) свидетельствуют, что перед Авачинским землетрясением появление тектонического давления зафиксировал только датчик, расположенный у подножия Петровской сопки.

Заключение

Временные ряды на рис. 5, полученные на Петровской сопке перед Авачинским землетрясением 2 марта 1992 г. с $M = 7{,}1$, характеризуют изменение тектонического давления в поверхностном слое вулканического пояса Курило-Камчатской дуги перед сильным землетрясением в зоне субдукции. Как видно на рис. 5, давление сначала увеличивалось, а потом плавно уменьшалось. Это означает, что нагрузка в очаге перед землетрясением росла, а достигнув максимума, стала падать, что указывает на развитие в очаге квазипластических деформаций и, следовательно, на приближение землетрясения.

В этой связи оценим (в среднем) величину деформации в поверхностном слое вулканического пояса во время роста и падения нагрузки в очаге перед Авачинским землетрясением.

Смещение верхней части геомеханического датчика относительно его основания во время роста давления, т.е. при сжатии Петровской сопки в период с октября 1990 г. до июня 1991 г., в направлении С–Ю было равно 5,9 мкм, а в направлении

З–В – 26,3 мкм. Суммарное смещение равнялось 26,9 мкм и имело геодезический азимут 255°. Следовательно, оно было вызвано тектоническими силами, возникшими в районе очага землетрясения.

Смещение верхней части геомеханического датчика относительно его основания во время падения давления, т.е. при расширении Петровской сопки в период с июня 1991 г. до 2 марта 1992 г., в направлении С–Ю было равно, 8,8 мкм, а в направлении З–В – 5,3 мкм. Суммарное смещение равнялось 10,3 мкм. Имея азимут 30°, оно было направлено нормально к продольной оси Петровской сопки.

Найденные смещения позволяют определить величину тектонических деформаций в поверхностном слое вулканического пояса перед Авачинским землетрясением. Расстояние между вершиной Петровской сопки по горизонтали и геомеханическим датчиком равно 1 км. Следовательно, деформация при росте давления была равна $2{,}7 \cdot 10^{-8}$. Полную величину деформации при росте давления определить невозможно, так как неизвестно время начала роста давления. Изменение же деформации при падении давления, то есть в период от максимума давления до момента землетрясения, не превышает $1{,}0 \cdot 10^{-8}$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сергеев Е.М., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С. и др. Грунтоведение. М.: Изд-во МГУ, 1973. 386 с.
2. Ившин В.М. Скважинный наклономер НИВ-1 // Вулканология и сейсмология. 1993. № 5. С. 105–112.
3. Ившин В.М. Результаты геомеханических исследований на Камчатке // Вестн. ДВО РАН. 2021. № 1. С. 22–37.
4. Тимошенко С.П. Теория упругости. Л.-М.: ОНТИ, 1937. 451 с.
5. Зобин В.М., Гордеев Е.И., Левина В.И. и др. Камчатское землетрясение 2 марта 1992 г. (магнитуда MLH = 7,1) в Авачинском заливе и связанные с ним явления // Вулканология и сейсмология. 1996. № 6. С. 48–61.

REFERENCES

1. Sergeev E.M., Golodkovskaja G.A., Ziangirov R.S. i dr. Gruntovedenie. M.: Izd-vo MGU; 1973. 386 s. (In Russ.).
2. Ivshin V.M. Skvazhinnyj naklonomer NIV-1. *Vulkanologija i Sejsmologija.* 1993;(5):105–112. (In Russ.).
3. Ivshin V.M. Rezul'taty geomehanicheskih issledovanij na Kamchatke. *Vestnik FEB RAS.* 2021;(1):22–37. (In Russ.).
4. Timoshenko S.P. Teorija uprugosti. L.-M.: ONTI; 1937. 451 s. (In Russ.).
5. Zobin V.M., Gordeev E.I., Levina V.I. i dr. Kamchatskoe zemletrjasenie 2 marta 1992 g. (magnituda MLH = 7,1) v Avachinskom zalive i svjazannye s nim javlenija. *Vulkanologija i Sejsmologija.* 1996;(6):48–61. (In Russ.).

Научная статья
УДК 551.761.1:56.016.3(571.63)
DOI: 10.31857/S0869769824020062
EDN: ldiqzq

Палеоэкологическая и генетическая характеристики органогенной постройки горы Безымянная (Южное Приморье)

Е.Н. Малышева

Екатерина Николаевна Малышева
младший научный сотрудник
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
rumbum@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-6292-4757

Аннотация. Впервые дано литолого-палеоэкологическое описание органогенной постройки г. Безымянная. Проведено макро- и микроскопическое изучение фауны, слагающей постройку, определено ее процентное содержание в известняках, описана роль каждой группы организмов в процессе рифообразования. На основе полученных данных было установлено три генетических типа известняков, слагающих органогенную постройку: биогенные, биохемогенные и механогенные. Исследования таксономического состава и структуры сообществ позволили выделить два этапа в развитии органогенной постройки, соответствующих фациям: 1) биостромов и 2) биогермов. Дано описание каждой стадии развития. Сообщается о новых для данного местонахождениях находках некоторых видов сфинктозоа: *Belyaevaspongia insolita* Senowbari-Daryan et Ingavat Helmcke, 1994; *Colospongia lenis* Malysheva, 2018 и *Rhabdactinia columnaria* Yabe et Sugiyama, 1934.

Ключевые слова: сфинктозоа, Южное Приморье, г. Безымянная

Для цитирования: Малышева Е.Н. Палеоэкологическая и генетическая характеристики органогенной постройки горы Безымянная (Южное Приморье) // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 2. С. 62–69. http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020062, EDN: ldiqzq

Благодарности. Автор выражает благодарность своей коллеге старшему научному сотруднику лаборатории стратиграфии и палеонтологии к.г.-м.н. Т.А. Пуниной за консультации и редактирование текста. А также считаю должным выразить благодарность и признательность анонимным рецензентам за уделенное внимание и ценные советы.

Финансирование. Работа выполнена в соответствии с темой НИР ДВГИ ДВО РАН (№ 0270-2016-0001).

Original article

Paleoecological and genetic characteristics of the organogenic structure of Mount Bezymyannaya (Southern Primorye)

E.N. Malysheva

Ekaterina N. Malysheva
Junior Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
rumbum@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-6292-4757

Abstract. For the first time, a lithological-paleoecological description of the organogenic construction of Mount Bezymyannaya is given. A macro- and microscopic study of the fauna composing the structure was carried out, its percentage content in limestones and the role of each group of organisms in the process of reef formation were determined. Based on the data obtained, three genetic types of limestones composing the organogenic structure were established: biogenic, biochemogenic and mechanogenic. Studies of the taxonomic composition and structure of communities allowed us to identify two stages in the development of organogenic construction corresponding to facies: 1) biostromes and 2) biogerms. A description of each stage of development is given. The findings of some sphinctozoan species new to this locality are reported: *Belyaevaspongia insolita* Senowbari-Daryan et Ingavat Helmcke, 1994; *Colospongia lenis* Malysheva, 2018 and *Rhabdactinia columnaria* Yabe et Sugiyama, 1934.

Keywords: Sphinctozoa, South Primorye, Mount Bezymyannaya

For citation: Malysheva E.N. Paleoecological and genetic characteristics of the organogenic structure of Mount Bezymyannaya (Southern Primorye). *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(2):62–69. http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020062, EDN: ldiqzq

Acknowledgments. The author expresses gratitude to his colleague, a senior researcher at the Laboratory of Stratigraphy and Paleontology Ph.D. T.A. Punina for consultations and editing. And I also consider it proper to express gratitude and appreciation to anonymous reviewers for their attention and valuable advice to help improve the writing of the article.

Funding. The work was carried out in accordance with the research theme of the FEGI FEB RAS (No. 0270-2016-0001).

Введение

Изучение рифовых построек имеет важное значение для определения и восстановления палеоэкологических и палеогеографических условий в каждом конкретном периоде в истории Земли. Органогенные известняки являются хорошим ориентиром для палеогеографических реконструкций, а также установления возраста отложений.

В Южном Приморье широко распространены пермские карбонатные отложения. Они залегают на морских терригенных породах. Их мощность варьирует в пределах от 200 до 700 м, а выходы на поверхности (протяженность) достигают 150–1200 м. По палеонтологическим данным их возраст установлен как поздневордский–ранневучапинский [1–6].

Наблюдается определенная закономерность размещения органогенных известняков в Южном Приморье. Они встречаются в виде одиночных массивов и протягиваются цепочками вдоль р. Партизанская. В пермское время они представляли собой серию береговых рифов [1, 7]. Карбонатные массивы представлены одиночными округлыми возвышенностями и узкими скалистыми гребнями. Изучение этих массивов в данном регионе в разное время проводилось многими исследователями [1–3, 5–9 и др.].

Органогенный массив горы Безымянная (рис. 1, *а*, *б*) расположен на окраине г. Находка в северо-западной части бухты Читувай. В основании органогенной постройки с восточной стороны обнажаются терригенные породы, выше которых залегает мощный карбонатный массив высотой около 30 м, шириной около 50 м и протяженностью около 50 м. Он слагает полностью макушку вершины, хорошо виден издалека на местности. Вся южная и юго-восточная часть массива сложена криноидными известняками, в которых криноидеи составляют основную массу объема породы.

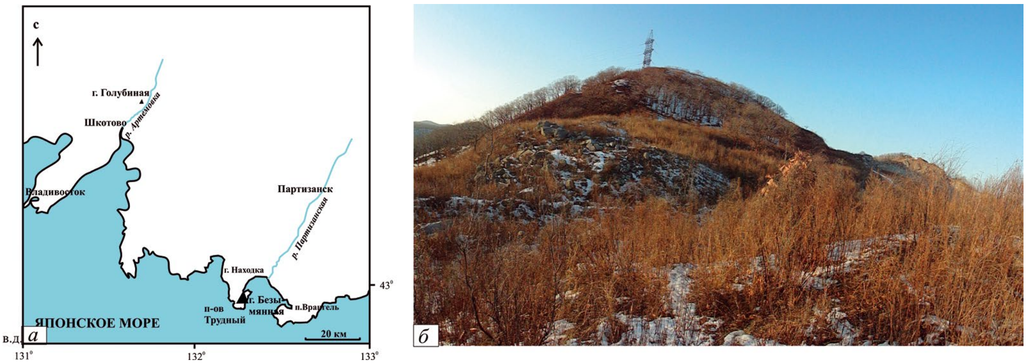


Рис. 1. Гора Безымянная: *а* – схема расположения, *б* – вид с дороги

Все упоминания о данном органогенном массиве связаны в основном с близким расположением около него Находкинского рифа, который довольно хорошо изучен в настоящее время [4]. В палеонтологическом и палеоэкологическом плане органогенный массив г. Безымянная практически не изучен. Немногочисленные исследования здесь связаны с находками сфинктозоа [10]. Г.В. Беляевой были обнаружены несколько их местонахождений в известняках данного массива [10]. В связи с этим возникает важность провести исследования, изучить состав ископаемой фауны в известняках, которая также представляет значимость для точного установления их возраста, а также продолжить изучение этой интересной группы организмов.

В данной работе впервые предпринята попытка детального изучения и расчленения известняков г. Безымянная и выяснения условий их формирования. Основная цель исследования – получение новых знаний о палеоэкологической и стратиграфической обстановке юга Приморского края, нахождение новых видов ископаемой фауны, прежде всего сфинктозоа.

Материалы и метод

Материалом для проведения исследования послужила коллекция образцов, отобранная из органогенных известняков г. Безымянная. В ходе полевых работ были проведены палеоэкологические и литологические исследования известняков, слагающих данную органогенную постройку.

Изучение сфинктозоа и других ископаемых организмов проведено традиционными методами макро- и микроскопического исследования с применением оптического микроскопа в лабораторных условиях.

Предварительное изучение в полевых условиях показало, что известняки на данном массиве, несомненно, являются органогенными и содержат фауну как в прижизненном положении, так и в виде обломков. Проанализирован таксономический состав найденных в известняках остатков животных, выяснены их общий облик, форма роста, прижизненное или нарушенное положение. Были отобраны коллекции образцов.

Последующее изучение в камеральных условиях включало в себя детальное рассмотрение и описание под микроскопом шлифов и пришлифовок. При изучении известняков применялся оптический микроскоп МБС-10. Осуществляли подсчет процентного содержания организмов при помощи таблиц М.С. Швецова [11].

С учетом всех полученных литологических и палеонтологических данных описан карбонатный массив с использованием следующих терминов: органогенная постройка, фации банки, фации биострома, фации биогерма и фации рифа [12].

Генетические типы известняков горы Безымянная

Проведенные палеонтологические и литологические исследования позволили выделить литотипы известняков, соответствующие трем генетическим типам: биогенные, биохемогенные и механогенные (см. таблицу, рис. 2).

Генетические типы известняков

Генетическая группа отложений	Литологические разновидности известняков
Биогенная	Биогермные: криноидные, сфинктозоидно-губково-криноидные, микробиально-водорослевые
Биохемогенная	Пизолитовые: водорослево-губково-мшанковые, пелитоморфные
Механогенная	Органогенно-обломочные

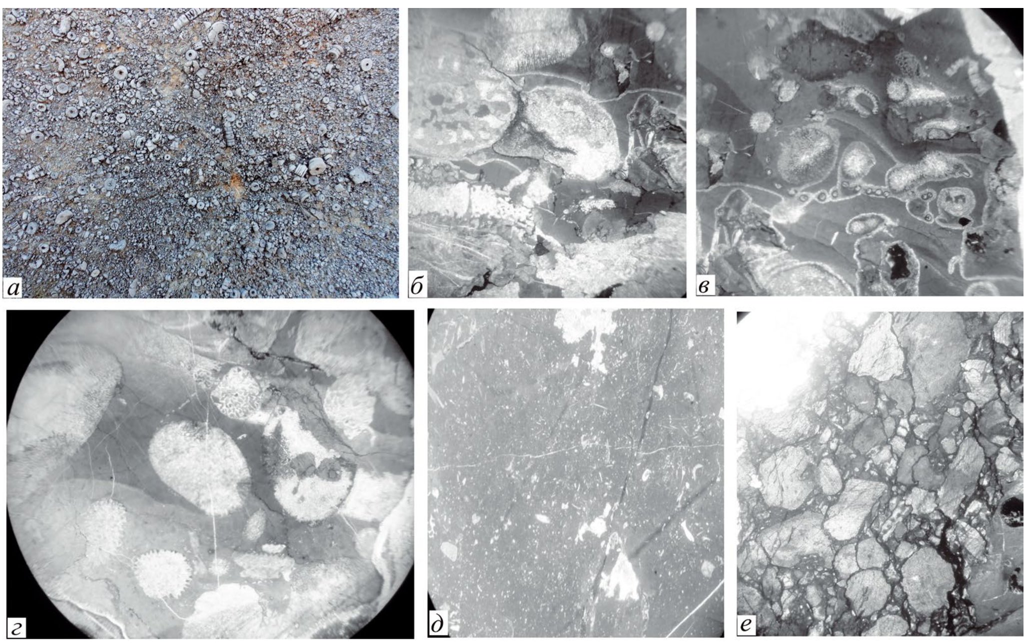


Рис. 2. Генетические типы известняков г. Безымянная. Биогенные известняки: *а* – криноидный, *б* – сфинктозоидно-губково-криноидный, *в* – микробиально-мшанково-водорослевый; биохемогенные: *г* – водорослево-губково-мшанковый, *д* – пелитоморфный; механогенные: *е* – органогенно-обломочный

Биогенные известняки характеризуются преобладанием скелетов организмов, сохранившихся на месте роста.

Криноидные известняки (рис. 2, *а*) образуют большую часть органогенного массива, криноидеи составляют до 70% породы. Встречаются редкие одиночные кораллы и губки. Эти известняки встречаются в южной и юго-восточной частях массива, формируют мощные линзы и пачки от 2 до 5 м. В небольшом количестве встречены мелкие фораминиферы и моллюски.

Сфинктозоидно-губково-криноидные известняки (рис. 2, *б*) – темно-серые, массивные. Отмечены единичные крупные кораллы (до 30 мм в поперечнике), губки длиной 10–15 см и диаметром до 3–4 см, сфинктозоа, в местах разрастания их колоний составляющие до 50% объема породы. Криноидеи занимают не более 15–20% объема породы. В небольшом количестве найдены гидроидные полипы и мелкие фораминиферы.

Микробиально-водорослевые известняки (рис. 2, *в*) – серые и темно-серые, образованные органическими остатками, сцементированными кальцитовым цементом. Органические остатки представлены водорослями, губками, криноидеями и сфинктозоа. Присутствуют комочки пелитоморфного кальцита диаметром до 2,0 мм, внутри иногда присутствуют обломки раковин фораминифер и члеников криноидей.

Биохемогенные известняки встречаются редко.

Водорослево-губково-мшанковые (рис. 2, *г*) характеризуются наличием сгустков с остатками рифостроящих организмов (мшанок, водорослей, губок) или комочков пелитоморфного кальцита. Комочки и сгустки эллипсоидальной формы, контуры четкие, иногда окружены светлой каемкой.

Пелитоморфные (рис. 2, *д*) обнаружены в средней части постройки, представлены темно-серыми породами, состоящими на 90% из пелитоморфной массы, в которой рассеян биокластовый материал – мелкие неокатанные обломки криноидей, сфинктозоа, водорослей и мелких фораминифер.

Среди **механогенных** выделены *органогенно-обломочные известняки* (рис. 2, *е*). Это серые и темно-серые породы, состоящие на 90% из пелитоморфной массы, в которой рассеян биокластовый материал. Они встречены в небольшом количестве, образуют в основном прослои среди других известняков мощностью до 0,5 м.

Краткая палеонтологическая характеристика горы Безымянная

Известняки массива г. Безымянная сложены разнообразной фауной, среди которой губки, криноидеи, водоросли, мшанки, мелкие фораминиферы и крупные фузулиниды, брахиоподы, моллюски, иглокожие и др. Были обнаружены фации биострома и биогерма. Биостромы представлены линзовидными телами мощностью до 5 м, сложенные преимущественно криноидеями, в меньшей степени водорослями, мшанками, губками, сфинктозоа, а также раковинами моллюсков и мелких фораминифер (рис. 3, *а, б*). Биогермы – выступающие мощные тела мощностью до 30 м. Состав организмов в них такой же, как и в биостромах, но отличается большим разнообразием рифостроителей, таких как криноидеи, сфинктозоа, водоросли, мшанки, губки. Процентное содержание этих организмов почти одинаковое, и они слагают бóльшую часть известняков, доминируя над мелкими фораминиферами и моллюсками (рис. 3, *в, г*).

Среди сфинктозоа встречаются: *Intrasporeocoelia orientalis* Belyaeva, *I. robusta* Belyaeva, *I. hubiensis* Fan et Zhang, *Belyaevaspongia insolita* Senowbari-Daryan et Ingavat-Helmcke, *Rhabdactinia columnaria* Yabe et Sugiyama, *Rh.* cf. *columnaria* Yabe et Sugiyama, *Girtycoelia orientalis* Belyaeva, *Amblysiphonella yuni* Zhang, *A. obliquisepta* Zhang, *A. eleganta* Belyaeva, *A. vesiculosa* (Konink),? *Cystauletes primoriensis* Belyaeva, *Cystothalamia crassa* Belyaeva, *Colospongia benjamini* (Girty), *C. composita* Belyaeva, *C. globosa* Belyaeva, *C. lenis* Malysheva. Находки данных организмов так же много-

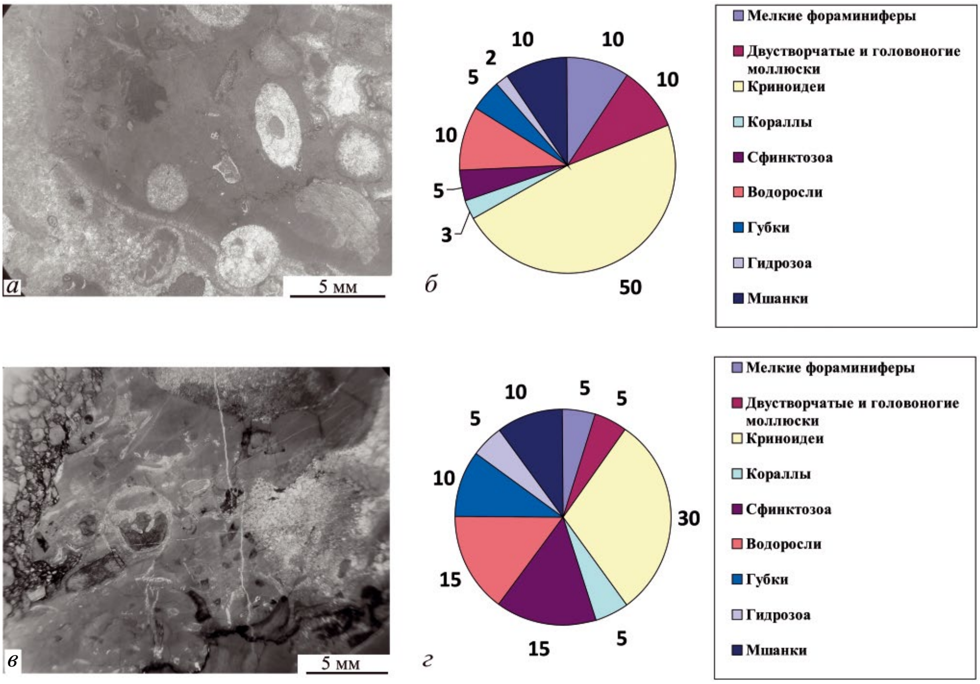


Рис. 3. Фации г. Безымянная: *а* – фации биострома, *б* – процентное содержание организмов в фациях биострома, *в* – фации биогерма, *г* – процентное содержание организмов в фациях биогерма

численны, как и на Находкинском рифе [1, 8, 10], но их состав отличается от предыдущих тем, что здесь преимущественно сифонатные формы – представители отряда *Porata* и практически не встречаются непористые представители, кроме *Girtycoelia*. Среди пористых преобладают роды *Colospongia* Laube, *Amblysiphonella* Steinmann и *Intrasporeocoelia* Fan et Zhang, более редкие – *Cystothalamia* Girty и *Cystauletes* King. Среди новых находок – виды *Belyaevaspongia insolita* Senowbari-Daryan et Ingavat Helmcke, 1994; *Colospongia lenis* Malysheva, 2018; *Rhabdactinia columnaria* Yabe et Sugiyama, 1934 (рис. 4).

Всего на г. Безымянная встречено 17 видов сфинктозоа, принадлежащих 8 родам из 5 семейств.

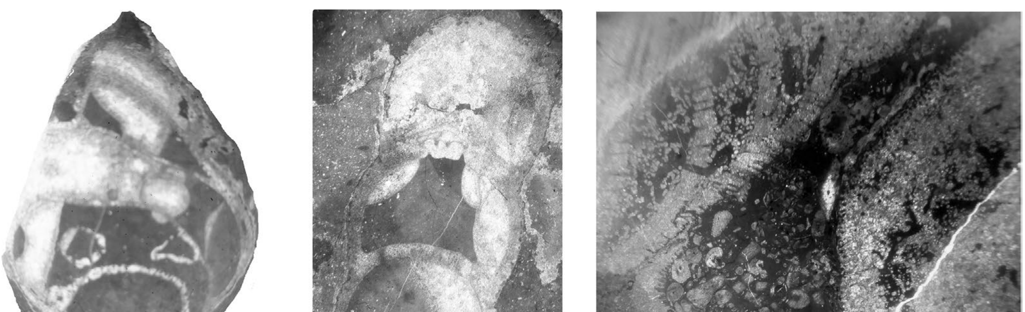


Рис. 4. Новые для г. Безымянная виды сфинктозоа: *а* – *Belyaevaspongia insolita* Senowbari-Daryan et Ingavat Helmcke, 1994; *б* – *Colospongia lenis* Malysheva, 2018; *в* – *Rhabdactinia columnaria* Yabe et Sugiyama, 1934

Заключение

Анализ результатов проведенных исследований, изучение текстурных, структурных и палеоэкологических характеристик известняков, слагающих органогенную постройку г. Безымянная, позволяет установить три их генетических типа: биогенные, биохемогенные и механогенные.

Учитывая избирательность сфинктозоа к определенным условиям окружающей среды, можно сделать вывод об определенных палеоэкологических условиях, при которых формировался данный органогенный массив.

Установлено, что сфинктозоа на г. Безымянная встречаются в составе биогермов и биостромов. Наибольшая их численность и видовое разнообразие приходится на фации биогермов. Здесь обнаружены новые местонахождения организмов: *Belyaevaspongia insolita* Senowbari-Daryan et Ingavat Helmcke, 1994; *Colospongia lenis* Malysheva, 2018; *Rhabdactinia columnaria* Yabe et Sugiyama, 1934.

На основе морфологических особенностей колоний сфинктозоа, в совокупности с другими сопутствующими ископаемыми группами, можно с большой достоверностью проводить реконструкции палеоэкологических условий образования содержащих их органогенных построек.

Результаты исследований всей фауны, обнаруженной в известняках г. Безымянная, указывают на то, что массив был, несомненно, органогенный и формировался на мелководье вблизи от берега. Данная органогенная постройка прошла путь развития от биострома до биогерма и завершилась, не достигнув конечного этапа – стадии развития рифа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Беляева Г.В., Тащи С.М. Органогенные постройки верхней перми Приморья // Тихоокеанская геология. 1996. Т 15, № 3. С. 50–67.

2. Киселева А.В. Позднепермские мшанки Южного Приморья. М.: Наука, 1982. 127 с.

3. Котляр Г.В. Пермские отложения Южного Приморья – ключ к прослеживанию ярусных подразделений международной и общей стратиграфических шкал // Тихоокеанская геология. 2015. Т. 34, № 4. С. 19–38.

4. Котляр Г.В., Вукс Г.П., Кропачева Г.С., Кушнарь Л.В. Находкинский риф и место людянзинского горизонта Южного Приморья в ярусной шкале пермских отложений Тетической области // Проблемы биостратиграфии перми и триаса Востока СССР. Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1987. С. 54–62.

5. Никитина А.П. Биостратиграфия верхнего палеозоя Приморья по фузулинидам // Вопросы биостратиграфии советского Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1974. С. 5–18.

6. Соснина М.И., Никитина А.П. Мелкие фораминиферы верхней перми Южного Приморья // Ископаемая флора и фауна Дальнего Востока и вопросы стратиграфии фанерозоя. Владивосток, 1977. С. 27–52.

7. Тащи С.М. Позднепермские рифовые постройки Южного Приморья // Вулканогенно-осадочные образования юга Дальнего Востока (литология и геохимия). Владивосток, 1978. С. 45–53.

8. Малышева Е.Н. Сравнительная характеристика комплексов сфинктозоа, обнаруженных в органогенных постройках Находкинского рифа и горы Брат (Южное Приморье) // Вестн. ДВО РАН. 2019. № 4. С. 120–128.

9. Малышева Е.Н., Пунина Т.А. Палеоэкологическая и фациальная характеристика органогенной постройки горы Сестра в Южном Приморье // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2023. № 2. С. 39–48.

10. Бойко Э.В., Беляева Г.В., Журавлева И.Т. Сфинктозоа фанерозоя территории СССР. М.: Наука, 1991. 224 с.

11. Швецов М.С. Петрография осадочных пород. 3-е изд., перераб и доп. М.: Госгеолтехиздат, 1958. 416 с.

12. Журавлева И.Т., Космынин В.Н., Кузнецов В.Г. и др. Современные и ископаемые рифы. Термины и определения. М.: Недра, 1990. 183 с.

REFERENCES

1. Belyaeva G.V., Tashchi S.M. Organogennye postroiki verkhnei permi Primor'ya = [Late Permian organogenic buildups in Primorye]. *Tikhookeanskaya geologiya*. 1996;15(3):50–67. (In Russ.).

2. Kiseleva A.V. Pozdnepermskie mshanki Yuzhnogo Primor'ya. Moscow: Nauka; 1982. 127 s. (In Russ.).

3. Kotlyar G.V. Permskie otlozheniya Yuzhnogo Primor'ya – klyuch k proslezhivaniyu yarusnykh podrazdelenii mezhdunarodnoi i obshchei stratigraficheskikh shkal = [Permian of South Primorye – a key for tracing of the Global and General stage boundaries]. *Tikhookeanskaya geologiya*. 2015;34(4):19–38. (In Russ.).
4. Kotlyar G.V., Vuks G.P., Kropacheva G.S., Kushnar' L.V. Nakhodkinskii rif i mesto lyudyanzinskogo gorizonta Yuzhnogo Primor'ya v yarusnoi shkale permskikh otlozhenii Teticheskoi oblasti = [Nakhodka reef-rock massif and the position of Ludianza horizon within the stage scale of the Permian in the Tethys]. In: *Problemy biostratigrafii permi i triasa Vostoka SSSR* = [*Problems of the Permian and Triassic biostratigraphy of the East USSR*]. Vladivostok: DVNTS AN SSSR; 1987. S. 54–62. (In Russ.).
5. Nikitina A.P. Biostratigrafiya verkhnego paleozoya Primor'ya po fuzulinidam. In: *Voprosy biostratigrafii Sovetskogo Dal'nego Vostoka*. Vladivostok: DVNTS AN SSSR; 1974. S. 5–18. (In Russ.).
6. Sosnina M.I., Nikitina A.P. Melkie foraminifery verkhnei permi Yuzhnogo Primor'ya. In: *Iskopaemaya flora i fauna Dal'nego Vostoka i voprosy stratigrafii fanerozoya*. Vladivostok; 1977. S. 27–52. (In Russ.).
7. Tashchi S.M. Pozdnepermskie rifovye postroiki Yuzhnogo Primor'ya. In: *Vulkanogenno-osadochnye obrazovaniya yuga Dal'nego Vostoka* (*litologiya i geokhimiya*). Vladivostok; 1978. S. 45–53. (In Russ.).
8. Malysheva E.N. Sravnitel'naya kharakteristika kompleksov sfinktozoa, obnaruzhennykh v organogennykh postroikakh Nakhodkinskogo rifa i gory Brat (Yuzhnoe Primor'e) = [Comparative characteristics of sphinktozoa complexes found in organogenic structures of the Nakhodkinskiy reef and Mount Brat (Southern Primorye)]. *Vestnik of the FEB RAS*. 2019;(4):120–128. (In Russ.).
9. Malysheva E.N., Punina T.A. Paleoehkologicheskaya i fatsial'naya kharakteristika organogennoi postroiki gory Sestra v Yuzhnom Primor'e = [Paleoecological and facial characteristics of the organogenic structure of Sestra Mountain in Southern Primorye]. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle.* 2023;(2):39–48. (In Russ.).
10. Boiko E.V., Belyaeva G.V., Zhuravleva I.T. Sfinktozoa fanerozoya territorii SSSR = [Sphinctozoan of the Phanerozoic of the USSR]. Moscow: Nauka; 1991. 222 s. (In Russ.).
11. Shvetsov M.S. Petrografiya osadochnykh porod. 3-e izd., pererab i dop. M.: Gosgeoltekhizdat; 1958. 416 s. (In Russ.).
12. Zhuravleva I.T., Kosmynin V.N., Kuznesov V.G. et al. Sovremennye iskopaemye rify. Terminy i opredeleniya. Moscow: Nedra; 1990. 183 s. (In Russ.).

Научная статья
УДК 577.112.6:616.36-002:578.891
DOI: 10.31857/S0869769824020074
EDN: ldifvh

Значимость обнаружения антител к отдельным В-эпитопам оболочечных белков вируса гепатита С

М.Д. Стучинская✉, Л.И. Николаева, Н.Г. Шевченко, Г.В. Сапронов, Н.С. Шастина

Майя Денисовна Стучинская
аспирант
МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия
младший научный сотрудник
НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи, Москва, Россия
mayastaya@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-8544-7482

Людмила Ивановна Николаева
доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник
НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи, Москва, Россия
l.i.nikolaeva@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-1323-5568

Надежда Григорьевна Шевченко
младший научный сотрудник
НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи, Москва, Россия
dr.nadya@inbox.ru
https://orcid.org/0000-0002-2486-4554

Георгий Витальевич Сапронов
кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник
НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи, Москва, Россия
доцент
РМАНПО, Москва, Россия
g_sapronov@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-2154-2904

Наталья Сергеевна Шастина
кандидат химических наук, доцент
МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия
inosit@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-8382-7262

Аннотация. Вирус гепатита С (ВГС) – гепатотропный вирус, хроническая инфекция которого может привести к печеночной недостаточности, циррозу печени и гепатоцеллюлярной карциноме. Два вирусных оболочечных гликопротеина E1 и E2 опосредуют проникновение вируса в клетки хозяина и являются мишенями для вируснейтрализующих антител, играющих важную роль в ограничении инфекции. Цель исследования – проанализировать наличие антител к пептидам, воспроизводящим В-клеточные эпитопы оболочечных белков ВГС, для оценки их возможной ассоциации с элиминацией вируса. Синтез трех пептидов из оболочечных белков вируса проводился твердофазным методом. Аминокислотные последовательности пептидов соответствовали участкам 244–259 и 313–324 белка E1 и 395–411 белка E2. Иммунореактивность пептидов была проанализирована методом твердофазного иммуноферментного анализа (ИФА) с использованием сывороток крови 63 участников с острым и хроническим гепатитом С. По результатам ИФА установлено, что антитела выявляются у 55,6% участников (ошибка выборки 6,3%). Если титр антител к анализируемым пептидам был 1:80 или превышал его, то большинство участников завершали терапию с достижением устойчивого вирусологического ответа или наблюдался острый гепатит с элиминацией вируса. Этот факт может свидетельствовать о потенциальной значимости наличия антител к анализируемым В-клеточным эпитопам оболочечных белков ВГС в титре 1:80 или выше для позитивного исхода острой фазы инфекции и терапии препаратами прямого противовирусного действия.

Ключевые слова: синтетические пептиды, В-клеточные эпитопы, оболочечные белки вируса гепатита С, иммунореактивность

Для цитирования: Стучинская М.Д., Николаева Л.И., Шевченко Н.Г., Сапронов Г.В., Шастина Н.С. Значимость обнаружения антител к отдельным В-эпитопам оболочечных белков вируса гепатита С // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 2. С. 70–79.
http: dx.doi.org/10.31857/S0869769824020074, EDN: ldifvh

Original article

Significance of antibody detection to individual B-epitopes of envelope proteins of hepatitis C virus

M.D. Stuchinskaya, L.I. Nikolaeva, N.G. Shevchenko,
G.V. Sapronov, N.S. Shastina

Maya D. Stuchinskaya
Graduate Student
MIREA - Russian Technology University, Moscow, Russia
Junior Researcher
N.F. Gamaleya National Research Center for Epidemiology and Microbiology, Moscow, Russia
mayastaya@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-8544-7482

Lyudmila I. Nikolaeva
Doctor of Sciences in Biology, Leading Researcher
N.F. Gamaleya National Research Center for Epidemiology and Microbiology, Moscow, Russia
l.i.nikolaeva@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-1323-5568

Nadezhda G. Shevchenko
Junior Researcher
N.F. Gamaleya National Research Center for Epidemiology and Microbiology, Moscow, Russia
dr.nadya@inbox.ru
https://orcid.org/0000-0002-2486-4554

Georgy V. Sapronov
Candidate of Sciences in Medicine, Senior Researcher
N.F. Gamaleya National Research Center for Epidemiology and Microbiology, Moscow, Russia
Associat Professor
Russian Medical Academy of Continuing Professional Education, Moscow, Russia
g-sapronov@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-2154-2904

Natalya S. Shastina
Candidate of Sciences in Chemistry, Associat Professor
MIREA - Russian Technology University, Moscow, Russia
inosit@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-8382-7262

Abstract. Hepatitis C virus (HCV) is hepatotropic viruses, causing chronic infection, which can lead to liver failure, cirrhosis, and hepatocellular carcinoma. The two viral envelope glycoproteins E1 and E2 mediate the virus entry into host cells, and they are the targets of virus-neutralizing antibodies, which play an important role in limiting infection. The aim of the study was to analyze infected human antibody response to peptides reproducing B-cell epitopes of HCV envelope proteins to assess their possible association with virus elimination. The synthesis of three peptides from envelope proteins was carried out by the solid phase method. The immunoreactivity of the peptides was studied with blood sera from 63 participants with viral hepatitis C. The amino acid sequences of the peptides corresponded to region 244–259 and 313–324 of the E1 protein and 395–411 of the E2 protein. Peptide immunoreactivity was assessed by enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) using blood sera of 63 participants with acute and chronic hepatitis C. According to the results of ELISA, it was found that antibodies were detected in 55,6% (sampling error 6,3%) of participants. If the presence of an antibody titer was 1:80 or higher to the analyzed peptides, then the most participants completed therapy with a sustained virological response or acute hepatitis with the virus elimination. That may indicate the potential significance of the presence of antibodies to B-cell epitopes of HCV envelope proteins in this titer of high for a positive outcome of acute hepatitis C and therapy with direct antiviral drugs.

Keywords: synthetic peptides, B-cell epitopes, envelope proteins of hepatitis C virus, immunoreactivity

For citation: Stuchinskaya M.D., Nikolaeva L.I., Shevchenko N.G., Sapronov G.V., Shastina N.S. Significance of antibody detection to individual B-epitopes of envelope proteins of hepatitis C virus. *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(2):70–79. (In Russ.). http: dx.doi.org/10.31857/S0869769824020074, EDN: ldifvh

Введение

Вирусный гепатит С – парентеральная инфекция, этиологическим агентом которой является РНК-содержащий вирус гепатита С (ВГС), принадлежащий к роду *Hepacivirus* семейства Flaviviridae. Гепатит С является основной причиной тяжелых инвалидизирующих заболеваний печени. Эксперты ВОЗ считают, что ежегодно около 2 млн людей заражаются ВГС и около 500 тыс. умирают от последствий хронического гепатита С (ХГС) [1]. Острый гепатит С (ОГС) может протекать скрытно, в безжелтушной форме, и приблизительно в 25% случаев завершаться самопроизвольной элиминацией ВГС [2]. Соответственно, в 75% случаев развивается ХГС, который может привести к циррозу печени (ЦП) и гепатоцеллюлярной карциноме.

ВГС – сферический оболочечный вирус, геном которого представлен одноцепочечной РНК положительной полярности, состоящей примерно из 9600 нуклеотидов. Вирусный геном имеет одну уникальную открытую рамку считывания и кодирует полипротеин, содержащий около 3030 аминокислотных остатков (а.о.). Из последнего путем ферментативного протеолиза выщепляются структурные белки (нуклеокапсидный и оболочечные E1, E2) и неструктурные полипептиды (p7, NS2, NS3, NS4a, NS4b, NS5a и NS5b).

Оболочечные гликопротеины E1 и E2 взаимодействуют с рецепторами, участвуют в процессе проникновения вируса в клетки хозяина и являются основными мишенями вируснейтрализующих антител (ВНА), специфичных к ВГС [3, 4]. Ранее было показано, что появление ВНА на 48-й неделе после заражения сопровождалось последующей элиминацией вируса на 65-й неделе, что подтверждает значительную роль ВНА в контроле над ВГС-инфекцией [5]. После элиминации вируса титр ВНА быстро снижался. Напротив, у пациентов с последующим развитием ХГС наблюдалось отсутствие или низкий титр ВНА во время острой фазы инфекции и с нарастанием величины титра во время ХГС [6].

Большинство ВНА нацелены на эпитопы в гликопротеине E2 [7]. Изучение ВНА против E1 осложнено тем, что правильный процессинг и фолдинг E1 в отсутствие E2 не происходит [8]. Тем не менее несколько исследований продемонстрировали, что две основные области E1 являются мишенями для ВНА. Первая область представляет собой N-концевую часть белка (а.о. 192–207), которую распознают человеческие моноклональные антитела (H111), проявляющие слабую вируснейтрализующую активность [9]. Вторая иммуногенная область (а.о. 313–327), распознаваемая двумя моноклональными антителами (IGH505 и IGH526) с широкой нейтрализующей специфичностью, расположена на C-конце эктодомена E1 и является иммунодоминантной [10].

B-клеточные эпитопы гликопротеина E2 изучены более интенсивно, чем аналогичные эпитопы гликопротеина E1. В белке E2 выявлены иммунодоминантные антигенные участки AS412 (а.о. 412–423) и AS434 (а.о. 434–446), антигенная область AP3 и гипервариабельная область 1 (HVR1) (а.о. 384–411) [11]. Одной из главных мишеней ВНА во время острой и хронической инфекции является область HVR1 [12]. Ранее было показано, что на пептид, соответствующий N-концевому эпитопу HVR1, наиболее часто выявляются антитела у больных острым гепатитом С, а на пептид, соответствующий C-концевому эпитопу HVR1, – у больных ХГС [13].

Цель настоящего исследования – выявить антитела к пептидам, воспроизводящим консервативные B-клеточные эпитопы оболочечных белков E1 и E2 ВГС, и оценить их возможную значимость для прогноза элиминации вируса.

Материалы и методы исследований

Синтез пептидов осуществляли твердофазным методом путем наращивания пептидной цепи на полимерном носителе Ванга по Fmoc-протоколу в ручном режиме карбодиимидным способом и методом активированных эфиров, используя Fmoc-аминокислоты и их производные L-конфигурации (Merck, Германия) и стандартный протокол проведения синтетического цикла, закрытия непрореагировавших аминогрупп и отщепления пептида от полимерного носителя. Полноту реакции сочетания проверяли тестом Кайзера. Очистку пептидов осуществляли обращенно-фазовой высокоэффективной жидкостной хроматографией, структуру синтезированных пептидов подтверждали масс-спектрометрией MALDI-TOF (Bruker, Германия).

Пептид I имел первичную структуру AVTPTVATRDGKLPAT и воспроизводил иммуногенный B-эпитоп, соответствующий аминокислотным позициям 244–259 белка E1. Пептид II имел первичную структуру ITGHRMAWDMMM, соответствовал аминокислотным позициям 313–324 белка E1 и воспроизводил консервативный иммунодоминантный B-эпитоп. Пептид III имел консенсусную первичную структуру HTASGFASFLSPGPKQN, соответствовал аминокислотным позициям белка E2 395–411 и воспроизводил C-концевой B-эпитоп первого гипервариабельного региона [14].

Процедуру иммуноферментного анализа осуществляли в 96-луночных планшетах MediSorb (Nunc, Дания), сорбируя пептиды в лунки в концентрации 30 мкг/1 мл в 0,05 М карбонатно-бикарбонатном буфере (pH 9,5) на протяжении 16 ч при 4 °С. После закрытия участков неспецифического связывания бычьим сывороточным альбумином (1 мг/мл; Sigma, США) в 0,05 М фосфатно-солевом буфере (pH 7,4) в лунки вносили сыворотки в разведении 1:10. Дальнейшие этапы выполняли как описано ранее [13]. Результаты ИФА регистрировали, используя спектрофотометр StatFax 3200 (Awareness Technology, США), измеряя оптическую плотность (ОП) в двухволновом режиме: 450 нм (основной фильтр) и 650 нм (референс-фильтр). Результаты ИФА образцов представляли в виде коэффициента позитивности (КП), который рассчитывали, как отношение ОП образца к пороговой величине ОП. Последнюю величину определяли как сумму средней арифметической величины ОП от 10 отрицательных образцов и двухкратной стандартной ошибки среднего.

Сыворотки крови от 63 участников (30 мужчин и 33 женщины) с вирусным гепатитом С (без ВИЧ-инфекции и наличия вирусных гепатитов иной этиологии) были собраны в период с 2015 по 2019 г. Проведение данного исследования выполнено с соблюдением норм Хельсинской декларации Всемирной медицинской ассоциации и одобрено этическим комитетом Российской медицинской академии непрерывного профессионального образования. Участники исследования дали информированное согласие.

Группу с острым гепатитом С составили 8 человек в возрасте 24–32 года (мужчин – 3, женщин – 5). Группа без лечения сформирована из 25 участников в возрасте 36–57 лет (мужчин – 17, женщин – 8). У 4 участников стадии фиброза составили F3 и F4, у остальных – от F0 до F2. Участники, получавшие терапию препаратами прямого противовирусного действия (ПППД), вошли в третью группу (n = 30), диапазон возраста 25–64 (мужчин – 19, женщин – 11). Стадии фиброза F3 и F4 у 4 участников, от F0 до F2 – у остальных.

Стадии фиброза печени выявляли методом транзиентной фиброэластометрии на приборе Fibroscan FS502 (Echosens, Франция). Для оценки степени выраженности фиброза использовали шкалу METAVIR.

С целью подтверждения диагноза и фазы инфекции выявляли геном вируса методом ОТ-ПЦР («РеалБест РНК HCV», качественный или количественный вариант, Вектор-Бест, РФ) и специфические антитела методом ИФА («РекомбиБест анти-ВГС IgM» и «Бест анти-ВГС – спектр», Вектор-Бест, РФ).

Статистическую обработку полученных данных выполняли, используя пакет программ Statistica v. 10.0 (StatSoft Inc., Tulsa, США). Количественные показатели представляли как среднее арифметическое ± стандартная ошибка среднего. При наличии нормального распределения для оценки достоверности различий использовали t критерий Стьюдента, при ином распределении применяли $\chi 2$ критерий, в случае необходимости использовали тест с поправкой Йетса и точный метод Фишера. Различия между сравниваемыми величинами считали достоверными при $p < 0,05$.

Результаты исследований

Среди проанализированных 63 образцов (от 63 пациентов) антитела к пептидам были обнаружены в 35 пробах, что соответствует частоте обнаружения 55,6 ± 6,3%. На рис. 1 представлена частота выявления антител к трем пептидам.

Частота обнаружения антител к отдельным трем пептидам была без значимых различий, т.е. ярко выраженного доминирования какого-либо пептида не отмечено.

Следующей задачей исследования был анализ частоты обнаружения антител в трех группах участников. Результаты представлены в табл. 1.

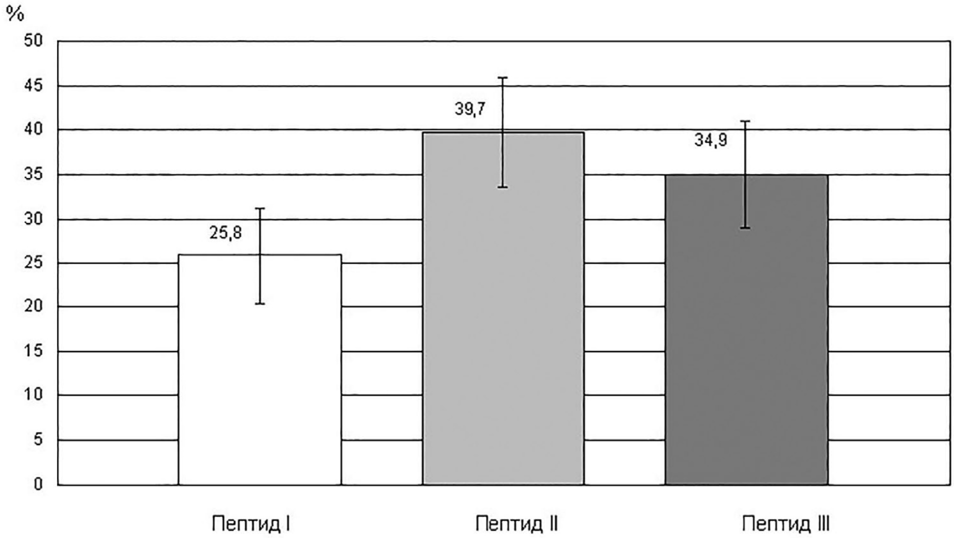


Рис. 1. Частота обнаружения (в %) антител к трем пептидам с учетом ошибки выборки

Таблица 1

Частота обнаружения и титры антител в группах участников

Параметры	ОГС (n = 8)	ХГС без терапии (n = 25)	ХГС с терапией (n = 30)	Достоверность различий
Частота обнаружения, n (%)	6 (75,0 ± 16,4)	11 (44,0 ± 10,1)	18 (60,0 ± 9,1)	P > 0,05 для всех групп
Титр доминирующий минорные	1:10 у 66,7% 1:20 и 1:80 в 2 образцах	1:10 у 72,7% 1:20 в 3 образцах	1:10 у 77,8% 1:20–1:80 в 4 образцах	P > 0,05 для всех групп

Надо отметить, что во всех группах преобладающим титром был 1:10. Участники с ОГС чаще всего имели антитела к анализируемым пептидам. Однако, учитывая, что эта группа была самой малочисленной, данное заключение нуждается в подтверждении. Участники с ОГС были взяты на мониторинговое наблюдение, у двух из них доказана элиминация вируса длительным отсутствием РНК (3–4 года). У одного из этих двух участников титры антител к трем пептидам были 1:80 (I) и 1:160 (II и III). У второго участника были обнаружены антитела только к II и III пептиду в титре 1:10, а также к нуклеокапсидному антигену в этом же титре (в последнем случае использовали сертифицированную тест-систему «Бест анти-ВГС – спектр»). На протяжении всего периода наблюдения у данного участника не обнаруживались антитела к антигенам NS3, NS4a, NS4b, NS5a, NS5b, что нетипично для ОГС. Вероятно, сказались иммунологические особенности данного участника.

В трех образцах участников без терапии были выявлены антитела к пептидам в титре 1:20, причем в каждом образце только к одному из пептидов. У участников, получавших ПППД, в шести образцах антитела были обнаружены в титрах от 1:20 до 1:80.

Следующей задачей был анализ взаимосвязи титра антител с результатом терапии. На рис. 2 представлены данные по частоте выявления антител у участников, достигших устойчивого вирусологического ответа (УВО), и участников, завершивших терапию без него.

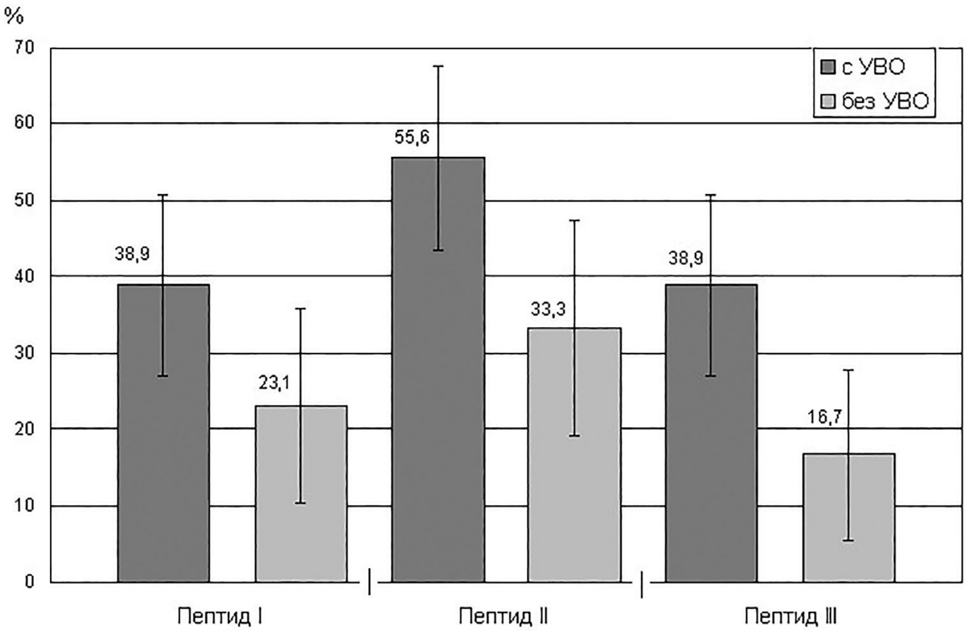


Рис. 2. Частота обнаружения (в %) антител к трем пептидам у участников с разным результатом лечения

Достоверных различий в частоте выявления антител к какому-либо одному из трех пептидов у участников, достигших УВО или завершивших терапию без него, нет.

Следующей задачей был анализ ассоциации между достижением УВО и наличием антител к одному или нескольким пептидам одновременно. Результаты этого анализа представлены в табл. 2.

Таблица 2

Анализ взаимосвязи между достижением УВО и наличием антител к пептидам

Наличие антител	Участники с УВО (n = 18)	Участники без УВО (n = 12)	Достоверность различий
К одному пептиду, % (n)	5,6 ± 5,5 (1)	66,7±15,1 (8)	P = 0,0086
К двум пептидам, % (n)	38,9 ± 11,8 (7)	0 (0)	P = 0,0242
К трем пептидам, % (n)	16,7 ± 9,0 (3)	8,3 ± 8,3 (1)	P = 0,6315

Как следует из данных табл. 2, наличие антител только к одному пептиду характерно для участников, не достигших УВО (достоверная ассоциация); к двум пептидам – для участников, достигших УВО (достоверная ассоциация). Логично было бы ожидать, что наличие антител к трем пептидам тоже должно быть ассоциировано с достижением УВО, но малочисленность группы и тот факт, что участник, имеющий антитела к трем пептидам, не достиг УВО из-за того, что прервал курс терапии, нарушило взаимосвязь.

Относительно титров антител к пептидам обнаружены интересные закономерности. В исследовании участвовали 10 человек с ХГС в цирротической стадии, 3 из них достигли УВО, 7 – нет. У 6 из 7 участников без УВО титр антител составил 1:10, а у 1 участника титр к пептиду I был 1:80. Этот участник почти достиг УВО (РНК ВГС отсутствовала на 5-м месяце после окончания терапии, но на 6-м месяце она была обнаружена). У 1 участника с УВО титр антител к пептиду II был 1:80, и у него уже 5 лет не выявляется РНК. Можно предположить, что титр 1:80 ассоциирован с достижением УВО или элиминацией вируса при ОГС. Вероятно, правомерно и противоположное заключение: наличие антител в титре меньше 1:80 ассоциировано с недостижением УВО и хронизацией ВГС в острой фазе инфекции.

Обсуждение результатов

Синтезированный пептид I воспроизводил область белка E1 с а.о. 244–259, которую ранее A. Zibert с соавт. оценили как иммунологически значимую с частотой обнаружения антител от 11 до 46% в зависимости от групп инфицированных участников [15]. Ранее было показано, что область 242–261 а.о. белка E1 участвует в связывании ВГС с клетками HepG2 [16]. В аминокислотной последовательности 244–260 а.о. белка E1 ВГС есть сходство с участком 344–362 а.о. оболочечного белка E вируса клещевого энцефалита, еще одного представителя семейства Flaviviridae [17]. В нашем исследовании антитела к пептиду I выявлялись в 25,8 ± 5,4% образцов, и это самый низкий результат относительно двух других пептидов, что свидетельствует о невысокой иммуногенности этой области белка E1.

Пептид II моделирует область B-клеточного эпитопа, имеющего высококонсервативную аминокислотную последовательность, антитела к которой вызывают межгенотипную перекрестную нейтрализацию [18]. Анализируя область 311–330 а.о. (близкую к нашему пептиду II), A. Zibert с соавт. показали, что антитела к ней выявляются в зависимости от групп инфицированных участников с частотой 39–58% [14]. В нашем исследовании антитела к пептиду II были выявлены наиболее часто среди всех трех пептидов – в 39,7 ± 6,2% образцов.

Пептид III представлял собой вариант консенсусной последовательности C-концевой области HVR1. Близкую область (384–395 а.о.) анализировали A. Zibert с соавт., которые показали, что 39% сывороток инфицированных имеют антитела к этой области [15]. Наши данные близки результату A. Zibert с соавт. Известно, что участок 396–407 а.о. входит в область контакта с рецептором CD81 и на него образуются ВНА [19].

Таким образом, два из трех проанализированных пептидов воспроизводили участки, на которые образуются ВНА, один – участок связывания с гепатомной клеточной линией HepG2. Поэтому данные пептиды могут рассматриваться как кандидаты на включение в разработку вакцины от гепатита С. Наличие антител к пептидам может быть прогностическим признаком. Наличие антител только к одному пептиду было характерно для пациентов, не достигших УВО (P = 0,0086). Если выявлялись антитела к двум пептидам, то этот факт был ассоциирован с достижением УВО (P = 0,0242). Еще одно потенциальное значение наличия антител к этим пептидам заключается в том, что, если антитела к ним имеют титр 1:80 и выше, то это позитивный прогностический маркер для терапии ПППД и элиминации ВГС в острой фазе инфекции.

Заключение

В представленном исследовании показано, что три химически синтезированных пептида из оболочечных белков E1 и E2 ВГС выявляли антитела у участников как с острым, так и с хроническим гепатитом С. Около половины образцов сывороток (55,6 ± 6,3%) имели антитела к этим пептидам, но в большинстве проб титры были низкими – 1:10. Наиболее высокий титр составил 1:160 и был обнаружен у участника с ОГС, у которого гепатит завершился элиминацией вируса. Все участники с титром 1:80 (кроме одного) завершили терапию ПППД с достижением УВО. Чаще всего антитела регистрировались к пептиду II, воспроизводящему консервативный иммунодоминантный В-эпитоп белка E1. Данные три пептида могут рассматриваться как кандидаты на включение в разработку вакцины от гепатита С. Вероятно, наличие антител к этим пептидам в титре 1:80 и выше имеет позитивное прогностическое значение для оценки исхода ОГС и терапии ПППД. Наличие антител только к одному пептиду (любому) было характерно для участников, завершивших терапию без УВО. Если были выявлены антитела к двум пептидам, то участники достоверно чаще достигали УВО.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. World Health Organization. Global Hepatitis Report, 2017 / World Health Organization. Geneva, Switzerland, 2017. 83 p. URL: https://www.who.int/hepatitis/publications/global-hepatitis-report2017/en/ (accessed on 20.03.2023).

2. Wang R., Suzuki S. et al. Induction of broadly neutralizing antibodies using a secreted form of the hepatitis C virus E1, E2 heterodimer as a vaccine candidate // PNAS. 2022. Vol. 119, N11.

3. Colpitts C.C., Tsai P.L., Zeisel M.B. Hepatitis C virus entry: An intriguingly complex and highly regulated process // Int. J. Mol. Sci. 2020. Vol. 21. P. 2091.

4. Sepulveda-Crespo D., Resino S., Martinez I. Hepatitis C virus vaccine design: focus on the humoral immune response // J. Biomed. Sci. 2020. Vol. 27. P. 78.

5. Raghuraman S., Park H., Osburn W.O., Winkelstein E., Edlin B.R., Rehermann B. Spontaneous clearance of chronic hepatitis C virus infection is associated with appearance of neutralizing antibodies and reversal of T-cell exhaustion // J. Infect. Dis. 2012. Vol. 205, N5. P. 763–771.

6. Pestka J.M., Zeisel M.B., Bläser E. et al. Rapid induction of virus-neutralizing antibodies and viral clearance in a single-source outbreak of hepatitis C // Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 2007. Vol. 104, N14. P. 6025–6030.

7. Quadeer A.A., Louie R.H.Y., McKay M.R. Identifying immunologically-vulnerable regions of the HCV E2 glycoprotein and broadly neutralizing antibodies that target them // Nat. Com. 2019. Vol. 10. P. 2073.

8. Cocquerel L., Meunier J.C., Op de Beeck A., Bonte D., Wychowski C., Dubuisson J. Coexpression of hepatitis C virus envelope proteins E1 and E2 in cis improves the stability of membrane insertion of E2 // J. Gen. Virol. 2001. Vol. 82, № 7. P. 1629–1635.

9. Keck Z.Y., Sung V.M.H., Perkins S. et al. Human monoclonal antibody to hepatitis C virus E1 glycoprotein that blocks virus attachment and viral infectivity // J. Virol. 2004. Vol. 78, N13. P. 7257–7263.

10. Mesalam A.A., Desombere I., Farhoudi A. et al. Development and characterization of a human monoclonal antibody targeting the N-terminal region of hepatitis C virus envelope glycoprotein E1 // Virology. 2018. Vol. 514. P. 30–41.

11. Tzarum N., Wilson I.A., Law M. The neutralizing face of hepatitis C virus E2 envelope glycoprotein // Front. Immunol. 2018. Vol. 9. P. 1315.

12. Farci P., Shimoda A., Wong D. et al. Prevention of hepatitis C virus infection in chimpanzees by hyperimmune serum against the hypervariable region 1 of the envelope 2 protein // Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 1996. Vol. 93, N26. P. 15394–15399.

13. Николаева Л.И., Петрова Е.В., Финогенова М.П. Антитела к оболочечным белкам E1 и E2 у людей, инфицированных вирусом гепатита С // Эпидемиология и вакцинопрофилактика. 2006. Т. 1, № 26. С. 37–41.

14. Sobolev B.N., Poroikov V.V., Olenina L.V., Kolesanova E.F., Archakov A.I. Comparative analysis of amino acid sequences from envelope proteins isolated from different hepatitis C virus variants: possible role of conservative and variable regions // J. Viral. Hepat. 2000. Vol. 7, N5. P. 368–374.

15. ZibertA., Kraas W., Ross R.S., Meisel H., Lechner S., Jung G., Roggendorf M. Immunodominant B-cell domains of hepatitis C virus envelope proteins E1 and E2 identified during early and late time points of infection // J. Hepatol. 1999. Vol. 30, N2. P. 177–184.

16. Garcia J.E., Puentes A., Súarez J., López R., Vera R., Rodríguez L.E., Ocampo M., Curtidor H., Guzman F., Urquiza M., Patarroyo M.E. Hepatitis C virus (HCV) E1 and E2 protein regions that specifically bind to HepG2 cells // J. Hepatol. 2002. Vol. 36, N2. P. 254–262.

17. Garry R.F., Dash S. Proteomics computational analyses suggest that hepatitis C virus E1 and pestivirus E2 envelope glycoproteins are truncated class II fusion proteins // Virology. 2003 Vol. 307, N2. P. 255–265.

18. Giang E., Dorner M., Prentoe J.C., Dreux M., Evans M.J., Bukh J., Rice C.M., Ploss A., Burton D.R., Law M. Human broadly neutralizing antibodies to the envelope glycoprotein complex of hepatitis C virus // Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 2012. Vol. 109, N16. P. 6205–6210.

19. Owsianka A., Clayton R.F., Loomis-Price L.D., McKeating J.A., Patel A.H. Functional analysis of hepatitis C virus E2 glycoproteins and virus-like particles reveals structural dissimilarities between different forms of E2 // J. Gen. Virol. 2001. Vol. 82, pt. 8. P. 1877–1883.

REFERENCES

1. World Health Organization. Global Hepatitis Report, 2017 / World Health Organization. Geneva, Switzerland; 2017. 83 p. URL: https://www.who.int/hepatitis/publications/global-hepatitis-report2017/en/ (accessed on 20.03.2023).
2. Wang R., Suzuki S., et al. Induction of broadly neutralizing antibodies using a secreted form of the hepatitis C virus E1, E2 heterodimer as a vaccine candidate. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 2022;119(11).
3. Colpitts C.C., Tsai P.L., Zeisel M.B. Hepatitis C virus entry: An intriguingly complex and highly regulated process. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020; 21(6):2091.
4. Sepulveda-Crespo D., Resino S., Martinez I. Hepatitis C virus vaccine design: focus on the humoral immune response. *Journal of Biomedical Science*. 2020;27:78.
5. Raghuraman S., Park H., Osburn W.O., Winkelstein E., Edlin B.R., Rehermann B. Spontaneous clearance of chronic hepatitis C virus infection is associated with appearance of neutralizing antibodies and reversal of T-cell exhaustion. *The Journal of Infectious Diseases*. 2012;205(5):763–771.
6. Pestka J.M., Zeisel M.B., Bläser E. et al. Rapid induction of virus-neutralizing antibodies and viral clearance in a single-source outbreak of hepatitis C. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2007;104(14):6025–6030.
7. Quadeer A.A., Louie R.H.Y., McKay M.R. Identifying immunologically-vulnerable regions of the HCV E2 glycoprotein and broadly neutralizing antibodies that target them. *Nature Communications*. 2019;10(1):2073.
8. Cocquerel L., Meunier J.C., Op de Beeck A., Bonte D., Wychowski C., Dubuisson J. Coexpression of hepatitis C virus envelope proteins E1 and E2 in cis improves the stability of membrane insertion of E2. *The Journal of General Virology*. 2001;82(7):1629–1635.
9. Keck Z.Y., Sung V.M., Perkins S. et al. Human monoclonal antibody to hepatitis C virus E1 glycoprotein that blocks virus attachment and viral infectivity. *Journal of Virology*. 2004;78(13):7257–7263.
10. Mesalam A.A., Desombere I., Farhoudi A. et al. Development and characterization of a human monoclonal antibody targeting the N-terminal region of hepatitis C virus envelope glycoprotein E1. *Virology*. 2018;514:30–41.
11. Tzarum N., Wilson I.A., Law M. The neutralizing face of hepatitis C virus E2 envelope glycoprotein. *Frontiers in Immunology.* 2018;9:1315.
12. Farci P., Shimoda A., Wong D. et al. Prevention of hepatitis C virus infection in chimpanzees by hyperimmune serum against the hypervariable region 1 of the envelope 2 protein. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1996;93(26):15394–15399.
13. Nikolaeva L.I., Petrova E.V., Finogenova M.P. Antibodies to envelope proteins E1 and E2 in people infected with hepatitis C virus. *Epidemiology and Vaccinal Prevention*. 2006;1(26):37–41. (In Russ.).
14. Sobolev B.N., Poroikov V.V., Olenina L.V., Kolesanova E.F., Archakov A.I. Comparative analysis of amino acid sequences from envelope proteins isolated from different hepatitis C virus variants: possible role of conservative and variable regions. *Journal of Viral Hepatitis*. 2000;7(5):368–374.
15. Zibert A., Kraas W., Ross R.S. et al. Immunodominant B-cell domains of hepatitis C virus envelope proteins E1 and E2 identified during early and late time points of infection. *Journal of Hepatology*. 1999;30(2):177–184.
16. Garcia J.E., Puentes A., Súarez J. et al. Hepatitis C virus (HCV) E1 and E2 protein regions that specifically bind to HepG2 cells. *Journal of Hepatology*. 2002;36(2):254–262.
17. Garry R.F., Dash S. Proteomics computational analyses suggest that hepatitis C virus E1 and pestivirus E2 envelope glycoproteins are truncated class II fusion proteins. *Virology*. 2003;307(2):255–265.
18. Giang E., Dorner M., Prentoe J.C. et al. Human broadly neutralizing antibodies to the envelope glycoprotein complex of hepatitis C virus. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2012;109(16):6205–6210.
19. Owsianka A., Clayton R.F., Loomis-Price L.D., McKeating J.A., Patel A.H. Functional analysis of hepatitis C virus E2 glycoproteins and virus-like particles reveals structural dissimilarities between different forms of E2. *Journal of General Virology*. 2001;82(pt. 8):1877–1883.

Научная статья
УДК 579.843:577.61
DOI: 10.31857/S0869769824020089
EDN: lddwqt

INDEL-типирование штаммов парагемолитических вибрионов *in vitro* и *in silico*

О.С. Чемисова, О.А. Цырулина✉, А.С. Водопьянов, С.О. Водопьянов, М.М. Сагакянц

Ольга Сергеевна Чемисова
кандидат биологических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»,
Ростов-на-Дону, Россия
chemisova@inbox.ru
https://orcid.org/0000-0002-4059-2878

Оксана Алексеевна Цырулина
кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
ФКУЗ Ростовский-на-Дону противочумный институт Роспотребнадзора,
Ростов-на-Дону, Россия
rykowskaya.oxana@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-6176-2605

Алексей Сергеевич Водопьянов
кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник
ФКУЗ Ростовский-на-Дону противочумный институт Роспотребнадзора,
Ростов-на-Дону, Россия
alexvod@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-9056-3231

Сергей Олегович Водопьянов
доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник
ФКУЗ Ростовский-на-Дону противочумный институт Роспотребнадзора,
Ростов-на-Дону, Россия
serge100v@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-4336-0439

Маргарита Мардиросовна Сагакянц
научный сотрудник
ФКУЗ Ростовский-на-Дону противочумный институт Роспотребнадзора,
Ростов-на-Дону, Россия
margsagak@rambler.ru
https://orcid.org/0000-0001-8235-3288

Аннотация. В статье представлены результаты изучения распределения INDEL-генотипов *Vibrio parahaemolyticus* в мире и Российской Федерации *in vitro* и *in silico* с использованием ранее разработанного способа INDEL-типирования на основании распределения аллелей шести локусов (Vp967, Vp08, Vp619, Vp2256, VpA472 и Vp506). Среди 2105 штаммов *V. parahaemolyticus*, взятых в исследование, было выявлено 30 уникальных INDEL-генотипов, семь из которых определены как мажорные. При этом выявлена географическая привязанность генотипа парагемолитических вибрионов к месту их выделения. На территории Российской Федерации выявлена циркуляция 17 INDEL-генотипов, преобладающим из которых оказался D2, обнаруженный только в Российской Федерации. Установлено, что предложенный метод INDEL-типирования является полезным инструментом при проведении эпидемиологических расследований, дающим возможность выявлять филогенетические связи между различными изолятами, что в свою очередь позволяет делать выводы об источниках заносов возбудителя на конкретную территорию.

Ключевые слова: INDEL-типирование, INDEL-локусы, *Vibrio parahaemolyticus*, парагемолитические вибрионы, генотип

Для цитирования: Чемисова О.С., Цырулина О.А., Водопьянов А.С., Водопьянов С.О., Сагакянц М.М. INDEL-типирование штаммов парагемолитических вибрионов *in vitro* и *in silico* // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 2. С. 80–89. https://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020089, EDN: lddwqt

Original article

INDEL-typing of strains of parahemolytic vibrions *in vitro* and *in silico*

O.S. Chemisova, O.A. Cyrulina, A.S. Vodop'yanov, S.O. Vodop'yanov, M.M. Sagakyanc

Ol'ga S. Chemisova
Candidate of Sciences in Biology, Associate Professor
Don State Technical University,
Rostov-on-Don, Russia
chemisova@inbox.ru
https://orcid.org/0000-0002-4059-2878

Oksana A. Cyrulina
Candidate of Sciences in Biology, Senior Researcher
The Federal Government Health Institution Rostov-on-Don Plague Control Researsh Institute of the Federal Service for Surveillance in the Sphere of Consumers Rights,
Rostov-on-Don, Russia
rykowskaya.oxana@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-6176-2605

Aleksej S. Vodop'yanov
Candidate of Sciences in Medicine, Senior Researcher
The Federal Government Health Institution Rostov-on-Don Plague Control Researsh Institute of the Federal Service for Surveillance in the Sphere of Consumers Rights,
Rostov-on-Don, Russia
alexvod@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-9056-3231

Sergej O. Vodop'yanov
Doctor of Sciences in Medicine, Leading Researcher
The Federal Government Health Institution Rostov-on-Don Plague Control Researsh Institute of the Federal Service for Surveillance in the Sphere of Consumers Rights,
Rostov-on-Don, Russia

serge100v@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-4336-0439

Margarita M. Sagakyanc
Researcher
The Federal Government Health Institution Rostov-on-Don Plague Control Researsh Institute of the Federal Service for Surveillance in the Sphere of Consumers Rights,
Rostov-on-Don, Russia
margsagak@rambler.ru
https://orcid.org/0000-0001-8235-3288

Abstract. The article presents the results of studying the distribution of *Vibrio parahaemolyticus* INDEL genotypes in the world and in Russia *in vitro* and *in silico* using the previously developed INDEL typing method based on the distribution of alleles of six loci (Vp967, Vp08, Vp619, Vp2256, VpA472, and Vp506). Among 2105 strains of *V. parahaemolyticus* taken in the study, 30 unique INDEL genotypes were identified, seven of which were identified as major. At the same time, geographical attachment between the genotype of parahaemolytic vibrions and the place of their isolation was revealed. The circulation of 17 INDEL genotypes was detected on the territory of the Russian Federation, the predominant of which was D2, found only in the Russian Federation. As a result, it was found that the proposed INDEL-typing method is a useful tool in conducting epidemiological investigations, which makes it possible to identify phylogenetic relationships between different isolates, which in turn makes it possible to draw conclusions about the sources of splinters of the pathogen to a specific territory.

Keywords: INDEL-typing, INDEL-loci, *Vibrio parahaemolyticus*, parahemolytic vibrions, genotype

For citation: Chemisova O.S., Cyrulina O.A., Vodop'yanov A.S., Vodop'yanov S.O., Sagakyanc M.M. INDEL-typing of strains of parahemolytic vibrions *in vitro* and *in silico*. *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(2):80–89. (In Russ.). https://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020089, EDN: lddwqt

Введение

Парагемолитические вибрионы – условно-патогенные галофильные микроорганизмы семейства Vibrionaceae, обитающие в морской и эстуарной среде по всему миру [1]. Выделяются из морской воды, рыб, креветок, мидий, устриц, омаров, крабов. Способны вызывать пищевые гастроэнтериты, протекающие по типу пищевой токсикоинфекции. Основной способ передачи заключается в употреблении в пищу сырых или недостаточно термически обработанных морепродуктов [2]. В редких случаях *Vibrio parahaemolyticus* вызывает раневую инфекцию, ушную инфекцию или сепсис, которые могут быть опасными для жизни людей с сопутствующими заболеваниями [3].

Впервые *V. parahaemolyticus* идентифицирован как причина пищевой инфекции в Японии в 1950 г. [4]. С 1960–1970-х годов парагемолитические вибрионы были обнаружены в прибрежных зонах морей и океанов, а вызываемые ими заболевания начали регистрировать в странах Азии, Африки, Америки, Западной Европы и Австралии. Патогенность *V. parahaemolyticus* связывают с наличием генов гемолизинов – термостабильного прямого (TDH – thermostable direct hemolysin) и TDH-родственного (TDH – related hemolysin) [5]. Для штаммов парагемолитических вибрионов характерна высокая генетическая вариабельность. Появление в 1996 г. в Индии нового клона *V. parahaemolyticus* O3: K6 привело к первому документированному так называемому пандемическому распространению *V. parahaemolyticus* [6]. Характерной особенностью данных штаммов является повышенный эпидемический и патогенетический потенциал.

На территории России галофильные вибрионы широко распространены в водах Азовского, Черного, Каспийского, Балтийского и Японского морей. Крупные вспышки были отмечены на побережье Черного и Азовского морей в 1984–1986 гг., во Владивостоке – в 1997, 2001, 2002, 2007 гг., а также в пос. Славянка Хасанского района Приморского края в 2012 г. [7–9].

Расследование вспышек опасных инфекционных заболеваний требует разработки эффективных методик внутривидовой дифференциации возбудителей и поиска генетических маркеров групп штаммов, имеющих большое эпидемиологическое значение. Одним из перспективных способов генотипирования, позволяющих выявлять индивидуальные различия и филогенетические связи между штаммами, является метод INDEL-типирования, основанный на определении вставок-делеций (IN-sertion-DELetion) в различных генах [10–12]. Ранее нами был предложен метод INDEL-типирования *V. parahaemolyticus* на основании распределения аллелей шести локусов (Vp967, Vp08, Vp619, Vp2256, VpA472 и Vp506) и показана возможность его использования [13]. Метод удобен и, главное, позволяет уверенно проводить INDEL-типирование *in silico* на основании сиквенсов из международных баз данных. В связи с этим целью настоящей работы является изучение распределения INDEL-генотипов *V. parahaemolyticus* в мире и Российской Федерации *in vitro* и *in silico.*

Материалы и методы

В исследование *in vitro* было взято 122 штамма *V. parahaemolyticus,* выделенных из различных источников в регионах Черного, Азовского, Японского морей на территории Российской Федерации в период с 2008 по 2020 г. Культуры были получены из лаборатории «Коллекция патогенных микроорганизмов» ФКУЗ Ростовский-на-Дону противочумный институт Роспотребнадзора, где хранились в лиофилизированном состоянии. ПЦР с сконструированными праймерами к шести INDEL-локусам вибрионов (табл. 1) проводили по ранее описанной методике [13, 14].

Таблица 1

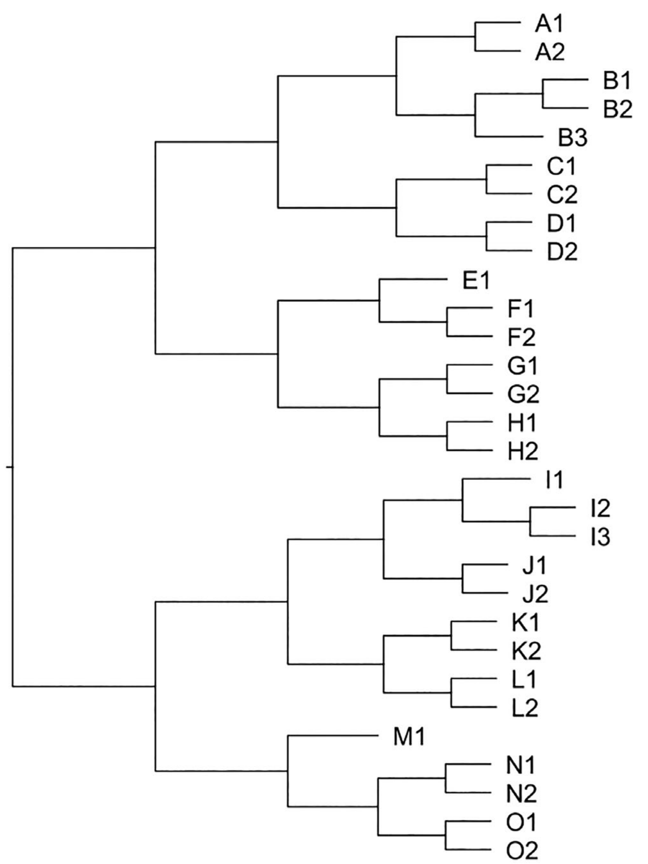
INDEL-локусы и праймеры, использованные в работе

INDEL-локус	Размер ампликона, п.о.	Структура праймеров	
		прямой	обратный
Vp967	112/94	acaaaagagcgagcactgaaac	gatccaagatgagctggaaaac
Vp08	104/89	tgaaaaactgggttaaggttgc	agacatgcccaccttgacttc
Vp619	114/92	acctgtgactgaaccagaacc	cccactgaatgaagctacctgt
Vp2256	111/99	aaaaagcggcagataatgcac	ccttatcaatggcttcttgtcc
VpA472	95/77	cgtgaactggcaagactgga	ccaatgcgatttggtaagtgtc
Vp506	85/79	aagcaccacagtcatcctgtaa	gcggtctgtagtcgtgtgaa

Виртуально *in silico* было изучено 1983 штамма из базы данных GenBank с известным географическим происхождением. Для анализа применяли авторское программное обеспечение Gene Expert, PrimerM и VirtualPCR, написанное на языке программирования Java. Сведения о месте и времени выделения штаммов были взяты из описания в GenBank. Кластерный анализ и построение дендрограммы проводили с использованием авторского программного обеспечения по методу UPGMA. Для построения дендрограммы использовали программу MEGA 5 [15].

Результаты

Среди включенных в исследование 2105 штаммов *V. parahaemolyticus* было выявлено 30 уникальных INDEL-генотипов, которые распределились между 15 кластерами, обозначенными буквами латинского алфавита с A по O (см. рисунок).



Дендрограмма, построенная на основе кластерного анализа распределения аллелей INDEL-локусов у штаммов *V. parahaemolyticus*

Установлено существование семи мажорных генотипов, представленных более чем 100 изолятами (C2, H2, L2, N1, N2, O1 и O2) и 23 минорных генотипа. В табл. 2 показано географическое распределение штаммов мажорных INDEL-генотипов в мире и Российской Федерации.

При анализе *in vitro* INDEL-генотипов 122 штаммов, выделенных в Российской Федерации, показано наличие 17 генотипов (5 мажорных и 12 минорных). При этом 4 «мировых» мажорных генотипа (O1, O2, N1 и N2) составили более 50% (64 штамма). Однако преобладающими оказались штаммы INDEL-генотипа D2, который в мире больше нигде не встречался и был характерен только для Российской Федерации (табл. 3). При этом большинство штаммов (31) данного генотипа было выделено

Таблица 2

Свойства мажорных INDEL-генотипов V. parahaemolyticus

INDEL-генотип	Число штаммов	Распространение в мире (по анализу in silico), годы	Распространение в России (по результатам in vitro), годы
C2	252	Китай (121), 2008–2018; США (96), 2008–2019; Перу (18), 2011–2016; Канада (7), 2008; Испания (6), 2012; Индия (1), 2014	Владивосток (3), 2019
H2	102	Китай (69), 2008–2017; США (21), 2008–2017; Перу (5), 2015–2017; Малайзия (3), 2014; Южная Корея (2), 2014, 2015	Таганрог (1), 2015; Геленджик (1), 2020
L2	205	Китай (151), 2008–2018; США (45), 2012–2014; Перу (2), 2009, 2017; Канада (2), 2008, 2010; Таиланд (2), 2008, 2015	Владивосток (1), 2019; Таганрог (Азовское море) (1), 2019; Новороссийск (1), 2015
N1	286	Китай (122), 2008–2019; США (94), 2009–2018; Перу (18), 2015–2017; Канада (3), 2009, 2012–2013; Таиланд (2), 2014; Малайзия (24), 2014, 2016–2017; Чили (1), 2015; Германия (1), 2009; Вьетнам (1), 2014; Южная Корея (2), 2016, 2017; Индия (1), 2016, Мексика (2), 2019; Венесуэла (1), 2018	Приморский край (10), 2015–2020; Азовское море (2), 2016, 2019; Черное море (2), 2012, 2020

Окончание таблицы 2

INDEL-генотип	Число штаммов	Распространение в мире (по анализу in silico), годы	Распространение в России (по результатам in vitro), годы
N2	239	Китай (123), 2008–2019; США (72), 2008–2019; Перу (12), 2015–2017; Канада (4), 2008–2010; Малайзия (2), 2009, 2017; Вьетнам (5), 2012–2014; Филиппины (1), 2015; Южная Корея (1), 2014; Мексика (1), 2014; Венесуэла (2), 2018; Испания (1), 2012; Великобритания (1), 2010	Приморский край (10), 2015–2021; Азовское море (2), 2019; Черное море (2), 2020
O1	292	Китай (154), 2008–2019; США (79), 2008–2019; Перу (18), 2013–2017; Канада (5), 2008, 2011–2012, 2014; Южная Корея (2), 2014; Мексика (8), 2013, 2014, 2019; Вьетнам (2), 2014; Индия (2), 2017; Венесуэла (2), 2018; Тихий океан (2), 2016	Азовское море (1), 2019; Черное море (2), 2020; Приморский край (15), 2009–2020
O2	304	Китай (126), 2008–2019; США (89), 2008–2019; Перу (49), 2008–2011, 2014–2017; Канада (7), 2009–2015; Южная Корея (1), 2017; Малайзия (3), 2016; Англия (4), 2014, 2009, 2010; Мексика (2), 2013; Венесуэла (2), 2018; Чили (2), 2015	Азовское море (4), 2015–2019; Черное море (1), 2015; Приморский край (14), 2009–2020

на территории Приморского края, из них 3 культуры от больного во Владивостоке в 2008 г. и 28 культур при вспышках в Уссурийске и пос. Славянка Хасанского района в 2012 г. И только 1 штамм INDEL-генотипа D2 был изолирован из морской воды в Таганроге в 2015 г.

Таблица 3

Мажорные INDEL-генотипы на территории Российской Федерации

Генотип	Число штаммов	Регион, год
D2	32	Славянка, 2012 (28); Владивосток, 2008 (3); Таганрог (1)
O1	18	Владивосток, 2018, 2019, 2020
O2	19	Владивосток, 2018, 2019, 2020
N1	13	Владивосток, 2021; Новороссийск, 2012
N2	14	Владивосток, 2018–2020

Обсуждение

При изучении вариабельности штаммов в соответствии с географической принадлежностью установлено, что мажорные генотипы (C2, H2, L2, N1, N2, O1 и O2) укоренились в своих регионах (Китай и США). Это подтверждается сохранением и циркуляцией вибрионов данных INDEL-генотипов на одной территории в течение долгого времени, именно в указанных регионах выделяют преобладающее количество штаммов. Согласуется это и с литературными сведениями о том, что *V. parahaemolyticus* является ведущим патогеном пищевого происхождения в Китае [16] и основной причиной гастроэнтерита, вызываемого морепродуктами, в США [17]. Штаммы минорных INDEL-генотипов, как правило, были выделены из объектов окружающей среды.

Особый интерес представляет вопрос распространения патогенных микроорганизмов на другие территории. Обращает внимания факт выделения в Перу в 2009 и 2017 гг. штаммов INDEL-генотипов L2 и O2, регистрируемых до этого в Китае. Раннее исследователями [18] было показано, что вспышка, которая произошла в 2009 г. в городах Республики Перу, обусловлена изолятами *V. parahaemolyticus*, принадлежащими к одному клональному комплексу, прежде описанному исключительно в Азии. Это не первый случай интродукции азиатских популяций патогенного *V. parahaemolyticus* на Тихоокеанское побережье Южной Америки. Как предполагается, такое может быть опосредовано действием Эль-Ниньо, за счет которого область нагретых приповерхностных вод смещается к востоку [18].

Штаммы, выделенные в 2012 г. в Испании и США, отнесены к одним и тем же INDEL-генотипам C2 и N2. Генетическое сходство этих штаммов подтверждается литературными данными о том, что летом 2012 г. вспышки инфекции *V. parahaemolyticus*, вызванные одинаковыми серотипами, произошли на Атлантическом побережье США и Испании и были связаны с потреблением морепродуктов. На общность данных «вспышечных» штаммов, полученных от пациентов из США и Испании, указывали результаты серологических тестов, ПЦР анализа на факторы вирулентности, гель-электрофореза в импульсном поле (PFGE) и метода типирования MLST. Вероятно, возможными механизмами распространения в окружающей среде и интродукции штаммов *V. parahaemolyticus* являются импорт и хранение живых зараженных двустворчатых моллюсков в местных водах, перенос штаммов с балластными водами на большие расстояния по океану в новые регионы. И в Нью-Йорке, и в Галисии ранее были вспышки инфекции *V. parahaemolyticus*, вызванной другими штаммами, что, видимо, обусловлено близостью крупных портов. Вспышки как в США, так и в Испании соответствовали во времени и пространстве более высоким, чем обычно, температурам поверхностной морской воды, что способствует увеличению распространения парагемолитических вибрионов [19].

Регистрация генотипов штаммов *V. parahaemolyticus*, не типичных для территорий, в отдельные годы отмечена также в Канаде, Испании, Индии и ряде других стран (табл. 2), что, вероятно, связано с заносом возбудителя на эти территории.

Стоит отметить, что штаммы, выделенные в Германии, представлены только двумя изолятами, отнесенными к генотипу N1 и L1. Штамм INDEL-генотипа N1 выделен в Германии из вод залива Балтийского моря (Килер-Фёрде) в 2009 г., а L1 – из вод Северного моря (порт Дагебюлль) в 2011 г. Отсутствие укоренения штаммов в акваториях Германии, вероятно, связано с температурой воды, которая значительно ниже по сравнению с тропическими морями. Распространение парагемолитических вибрионов в морской среде напрямую связано с температурой воды, и данный микроорганизм редко выявляется при температуре ниже 15 °, однако из-за глобального потепления на побережье Балтийского моря летом может возрасти количество инфекций, вызванных появлением в воде вибрионов [20].

Встречаемость «мировых» мажорных генотипов у штаммов, выделенных в Российской Федерации, говорит о периодических заносах этих штаммов на территорию нашей страны. Так, штаммы генотипа C2, общее количество которых составило 252 и которые в течение нескольких лет выделялись на территории США (2008–2019 гг.), Китая (2008–2018 гг.) и Перу (2011–2016 гг.), в России были обнаружены только в 2019 г. на территории Приморского края (г. Владивосток). Изоляты генотипа H2, циркулирующие в США (2008–2017 гг.), Китае (2008–2017 гг.), Перу (2015–2017 гг.), были выделены в Таганроге в 2015 г. и Геленджике в 2020 г. Парагемолитические вибрионы генотипа L2, укоренившиеся в Китае, США и Перу, также были изолированы в Владивостоке и Таганроге только в 2019 г. и Новороссийске в 2015 г. Штаммы INDEL-генотипов N1, N2, O1, O2 оказались преобладающими среди выделенных в Российской Федерации и циркулировали в отдельных регионах в течение нескольких лет.

В результате оценки INDEL-профилей, полученных при типировании *in vitro* коллекционных штаммов парагемолитических вибрионов, изолированных в Российской Федерации, выявлен генотип D2, который был представлен большинством изолятов и характерен только для Приморского края Российской Федерации. Штамм данного генотипа, выделенный из воды Азовского моря у г. Таганрог, можно считать завозным.

Заключение

В ходе проведенной работы показано, что предлагаемый метод INDEL-типирования *V. parahaemolyticus* на основании распределения аллелей 6 локусов является полезным инструментом для изучения молекулярной эпидемиологии, позволяющим выявлять особенности территориального распределения различных генотипов штаммов, и может быть успешно использован в эпидемиологическом надзоре при расследовании вспышек заболеваний. Указанный способ INDEL-типирования эффективен при анализе результатов полногеномного секвенирования вибрионов из международных баз данных в формате *in silico*, а также для типирования *in vitro* штаммов *V. parahaemolyticus*, выделенных в различных регионах Российской Федерации. Было выявлено 30 уникальных INDEL-генотипов, которые на основе кластерного анализа распределились между 15 кластерами. При этом установлено существование 7 «мировых» мажорных генотипов. Среди 17 INDEL-генотипов штаммов, выделенных на территории Российской Федерации, преобладающим оказался D2, который в мире нигде больше обнаружен не был. Полученные результаты изучения генотипов штаммов *V. parahaemolyticus* позволяют говорить об их географической привязанности к определенной территории, а встречаемость штаммов парагемолитических вибрионов различных INDEL-генотипов в разных регионах связано с их широким распространением с балластными водами судов и по путям транспорта морепродуктов, что согласуется с литературными данными [21, 22]. Также одной из движущих сил распространения вибрионов, по-видимому, являются океанские течения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wang R.Z., Huang J.D., Zhang W. et al. Detection and identification of *Vibrio parahaemolyticus* by multiplex PCR and DNA-DNA hybridization on a microarray // J. Genet. Genomics. 2011. Vol. 38. P. 129–135. DOI: 10.1016/j.jgg.2011.02.002.

2. Broberg C.A., Calder T.J., Orth K. *Vibrio parahaemolyticus* cell biology and pathogenicity determinants // Microbes Infect. 2011. Vol. 13. P. 992–1001. DOI: 10.1016/j.micinf.2011.06.013.

3. Zhang L., Orth K. Virulence determinants for *Vibrio parahaemolyticus* infection // Curr. Opin. Microbiol. 2013. Vol. 16 (1). P. 70–77. DOI: 10.1016/j.mib.2013.02.002.

4. Nair G.B., Ramamurthy T., Bhattacharya S.K. et al. Global dissemination of *Vibrio parahaemolyticus* serotype O3: K6 and its serovariants // Clin. Microbiol. Rev. 2007. Vol. 20, N1. P. 39–48. DOI: 10.1128/CMR.00025–06.

5. Yeung P.S., Boor K.J. Epidemiology, pathogenesis, and prevention of foodborne *Vibrio parahaemolyticus* infections // Foodborne Pathog. Dis. 2004. Vol. 1. P. 74–88. DOI: 10.1089/153531404323143594.

6. Velazquez-Roman J., Leon-Sicairos N., Hernandez-Diaz L., Canizalez-Roman A. Pandemic *Vibrio parahaemolyticus* O3: K6 on the American continent // Front. Cell. Infect. Microbiol. 2013. Vol. 3. P. 110. DOI: 10.3389/fcimb.2013.00110.

7. Маслов Д.В. Вспышка галофилеза среди населения города Владивостока Приморского края // Здоровье населения и среда обитания. 1997. № 12 (57). С. 17–21.

8. Ломов Ю.М., Кудрякова Т.А., Македонова Л.Д. и др. Галофильные вибрионы, обусловившие вспышку пищевой токсикоинфекции во Владивостоке // Журн. микробиол., эпидемиол. и иммунобиол. 2001. № 6. С. 3–7.

9. Рыковская О.А., Мазрухо А.Б., Смоликова Л.М., Монахова Е.В., Чемисова О.С., Подойницына О.А. и др. *Vibrio parahaemolyticus* серогруппы О3: К6 – возбудитель вспышек пищевой токсикоинфекции в Приморском крае Российской Федерации // Журн. микробиол., эпидемиол. и иммунобиол. 2013. № 4. С. 57–61.

10. Водопьянов А.С., Водопьянов С.О., Олейников И.П., Мишанькин Б.Н. INDEL-типирование штаммов *Vibrio cholerae* // Эпидемиол. и инфекцион. болезни. 2017. Т. 22 (4). С. 195–200. DOI: 10.18821/1560-9529-2017-22-4-195-200.

11. Liu F., Hu Y., Wang Q. et al. Comparative genomic analysis of *Mycobacterium tuberculosis* clinical isolates // BMC Genomics. 2014. Vol. 15, N1. P. 469. DOI: 10.1186/1471-2164-15-469.

12. Larsson P., Svensson K., Karlsson L. Canonical Insertion-Deletion markers for rapid DNA typing of *Francisella tularensis* // Emerg. Infect. Diseases. 2007. Vol. 13, N11. P. 1725–1732. DOI: 10.3201/eid1311.070603.

13. Чемисова О.С., Водопьянов А.С. Рыковская О.А. и др. Молекулярное типирование штаммов *Vibrio parahaemolyticus* на основе INDEL-маркеров // Инфекцион. болезни. 2018. № 7 (3). С. 26–30. DOI: 10.24411/2305-3496-2018-13004.

14. Мишанькин Б.Н., Водопьянов А.С., ЛомовЮ.М. Мультилокусное VNTR-типирование культур холерных вибрионов, выделенных в г. Казань во время вспышки холеры летом 2001 года // Журн. микробиол., эпидемиол. и иммунобиол. 2003. № 6. С. 11–15.

15. Tamura K., Peterson D., Peterson N., Stecher G., Nei M., Kumar S. MEGA5: Molecular evolutionary genetics analysis using maximum likelihood, evolutionary distance, and maximum parsimony methods // Mol. Biol. Evol. 2011.Vol. 28. P. 2731–2739.

16. Xiao Chen, Qiaoyun Zhu, Fei Yu, Wen Zhang et al. Serology, virulence and molecular characteristics of *Vibrio parahaemolyticus* isolated from seafood in Zhejiang province // PLOS One. 2018. Vol. 13, N 10. e0204892. DOI: 10.1371/journal.pone.0204892.

17. Scallan E., Hoekstra R.M., Angulo F.J. et al. Foodborne Illness Acquired in the United States-Major Pathogens // Emerg. Infect. Diseas. 2011. Vol. 17. P. 7–15. DOI: 10.3201/eid1701.P11101.

18. Martinez-Urtaza J., Huapaya B., Gavilan R.G. et al. Emergence of Asiatic *Vibrio* diseases in South America in phase with El Niño // Epidemiology. 2008. Vol. 19, N 6. P. 829–837. DOI: 10.1097/EDE.0b013e3181883d43.

19. Martinez-Urtaza J., Baker-Austin C., Jones J.L. et al. Spread of Pacific Northwest *Vibrio parahaemolyticus* // N. Engl. J. Med. 2013. Vol. 369. P. 1573–1574. DOI: 10.1056 /NEJMc1305535.

20. Kaneko T., Colwell R.R. Ecology of *Vibrio parahaemolyticus* in Chesapeake Bay // J. Bacteriol. 1973. Vol. 113, N 1. P. 24–32. DOI: 10.1128/jb.113.1.24-32.1973.

21. Бузолева Л.С., Летягина А.В., Звягинцев А.Ю., Кашин И.А. Исследование микроорганизмов, поступающих в порт Владивостока с балластными водами судов // Рос. журн. биол. инвазий. 2012. № 5 (1). С. 19–31.

22. Водяницкая С.Ю., Прометной В.И., Телесманич Н.Р., Рыжков Ю.В., Лях О.В., Трут И.В., Иванова Н.Г., Кругликов В.Д., Чемисова О.С. Результаты трехлетнего мониторинга судовых балластных вод в портах Ростовской области // Пробл. особо опасных инфекций. 2014. № 2. С. 108–110. DOI: 10.21055/0370-1069-2014-2-108-110.

REFERENCES

1. Wang R.Z., Huang J.D., Zhang W. et al. Detection and identification of *Vibrio parahaemolyticus* by multiplex PCR and DNA-DNA hybridization on a microarray. *Journal of Genetics and Genomics.* 2011;38:129-135. DOI: 10.1016/j.jgg.2011.02.002.

2. Broberg C.A., Calder T.J., Orth K. *Vibrio parahaemolyticus* cell biology and pathogenicity determinants. *Microbes and Infection.* 2011;13:992-1001. DOI: 10.1016/j.micinf.2011.06.013.

3. Zhang L., Orth K. Virulence determinants for *Vibrio parahaemolyticus* infection. *Current Opinion in Microbiology.* 2013;16(1):70-77. DOI: 10.1016/j.mib.2013.02.002.

4. Nair G.B., Ramamurthy T., Bhattacharya S.K. et al. Global dissemination of *Vibrio parahaemolyticus* serotype O3:K6 and its serovariants. *Clinical Microbiology Reviews.* 2007;20(1):39-48. DOI: 10.1128/CMR.00025-06.

5. Yeung P.S., Boor K.J. Epidemiology, pathogenesis, and prevention of foodborne *Vibrio parahaemolyticus* infections. *Foodborne Pathogens and Disease.* 2004;1:74-88. DOI: 10.1089/153531404323143594.

6. Velazquez-Roman J., Leon-Sicairos N., Hernandez-Diaz L., Canizalez-Roman A. Pandemic *Vibrio parahaemolyticus* O3:K6 on the American continent. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology.* 2013;3:110. DOI: 10.3389/fcimb.2013.00110.

7. Maslov D.V. Vspyshka galofileza sredi naseleniya goroda Vladivostoka Primorskogo kraya = [An outbreak of halophilosis among the population of the city of Vladivostok, Primorsky Krai]. Public Health and Life Environment. 1997;57(12):17-21. (In Russ.).

8. Lomov Yu.M., Kudryakova T.A., Makedonova L.D. et al. Galofil'nye vibriony, obuslovivshie vspyshku pishchevoj toksikoinfekcii vo Vladivostoke = [Halophilic vibrions that caused the outbreak of food toxicoinfection in Vladivostok]. *Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunobiology.* 2001;(6):3-7. (In Russ.).

9. Rykovskaya O.A., Mazruho A.B., Smolikova L.M., Monahova E.V., Chemisova O.S., Podojnicyna O.A. et al. *Vibrio parahaemolyticus* serogruppy O3:K6 – vozbuditel' vspyshek pishchevoj toksikoinfekcii v Primorskom krae Rossijskoj Federacii = [*Vibrio parahaemolyticus* of serogroup O3:K6 is the causative agent of outbreaks of food toxicoinfection in the Primorsky Territory of the Russian Federation]. *Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunology*. 2013;(4):57-61. (In Russ.).

10. Vodopyanov A.S., Vodopyanov S.O., Olejnikov I.P., Mishankin B.N. INDEL-genotyping of vibrio cholerae strains. *Epidemiology and Infectious Diseases.* 2017;22(4):195-200. (In Russ.). DOI: 10.18821/1560-9529-2017-22-4-195-200.

11. Liu F., Hu Y., Wang Q. et al. Comparative genomic analysis of *Mycobacterium tuberculosis* clinical isolates. *BMC Genomics*. 2014;15(1):469. DOI: 10.1186/1471-2164-15-469.

12. Larsson P., Svensson K., Karlsson L. Canonical Insertion-Deletion markers for rapid DNA typing of *Francisella tularensis*. *Emerging Infectious Diseases.* 2007;13(11):1725-1732. DOI: 10.3201/eid1311.070603.

13. Chemisova O.S., Vodopyanov A.S., Rykovskaya O.A. et al. Molecular typing of the *Vibrio parahaemolyticus* strains by INDEL markers. *Infectious Diseases.* 2018;7(3):26-30. (In Russ.). DOI: 10.24411/2305-3496-2018-13004.

14. Mishan'kin B.N., Vodop'yanov A.S., LomovYu.M. Mul'tilokusnoe VNTR-tipirovanie kul'tur holernyh vibrionov, vydelennyh v g. Kazan' vo vremya vspyshki holery letom 2001 goda = [Multilocus VNTRgenotyping of the cultures of *Vibrio cholerae* isolated in Kazan the outbreak of cholera in summer of 2001]. *Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunology.* 2003;(6):11-15. (In Russ.).

15. Tamura K., Peterson D., Peterson N., Stecher G., Nei M., Kumar S. MEGA5: Molecular evolutionary genetics analysis using maximum likelihood, evolutionary distance, and maximum parsimony methods. *Molecular Biology and Evolution.* 2011;28:2731-2739.

16. Xiao Chen, Qiaoyun Zhu, Fei Yu, Wen Zhang et al. Serology, virulence and molecular characteristics of *Vibrio parahaemolyticus* isolated from seafood in Zhejiang province. *PLOS One.* 2018;13(10). e0204892. DOI: 10.1371/journal.pone.0204892.

17. Scallan E., Hoekstra R.M., Angulo F.J. et al. Foodborne Illness Acquired in the United States-Major Pathogens. *Emerging Infectious Dieseases.* 2011;17:7-15. DOI: 10.3201/eid1701.P11101.

18. Martinez-Urtaza J., Huapaya B., Gavilan R.G. et al. Emergence of Asiatic *Vibrio* diseases in South America in phase with El Niño. *Epidemiology.* 2008;19(6):829-837. DOI: 10.1097/EDE.0b013e3181883d43.

19. Martinez-Urtaza J., Baker-Austin C., Jones J.L. et al. Spread of Pacific Northwest *Vibrio parahaemolyticus*. *New England Journal of Medicine.* 2013;369:1573-1574. DOI: 10.1056 /NEJMc1305535.

20. Kaneko T., Colwell R.R. Ecology of *Vibrio parahaemolyticus* in Chesapeake Bay. *Journal of Bacteriology.* 1973;113(1):24-32. DOI: 10.1128/jb.113.1.24-32.1973.

21. Buzoleva L.S., Letyagina A.V., Zvyagincev A.Yu., Kashin I.A. Investigation of microorganisms entering the port of Vladivostok with ballast waters of ships. *Russian Journal of Biological Invasions.* 2012;5(1):19-31. (In Russ.).

22. Vodyanitskaya S.Yu., Prometnoy V.I., Telesmanich N.R., Ryzhkov Yu.V., Lyakh O.V., Trut I.V., Ivanova N.G., Kruglikov V.D., Chemisova O.S. Results of the triennial monitoring over the ship's ballast water at the ports of the Rostov Region. *Problems of Particularly Dangerous Infections*. 2014;(2):108-110. (In Russ.). DOI.: 10.21055/0370-1069-2014-2-108-110.

Научная статья
УДК 550.47;551.464.626
DOI: 10.31857/S0869769824020098
EDN: ldbvzv

Лосось как основа функционирования экосистемы залива Академии (Охотское море). Возможные угрозы ее деградации

П.Я. Тищенко✉, П.Ю. Семкин, П.П. Тищенко, В.Б. Лобанов, А.Ф. Сергеев, М.О. Рогинская, Р.С. Анохина, Ю.А. Барабанщиков, А.А. Рюмина, С.Г. Сагалаев, М.Г. Швецова, Е.М. Шкирникова, О.А. Уланова

Павел Яковлевич Тищенко
доктор химических наук, главный научный сотрудник
Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
tpavel@poi.dvo.ru
https://orcid.org/0000-0002-3500-2861

Павел Юрьевич Семкин
кандидат географических наук, старший научный сотрудник
Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
pahnol@poi.dvo.ru
https://orcid.org/0000-0002-4639-918X

Петр Павлович Тищенко
кандидат географических наук, старший научный сотрудник
Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
eq15@poi.dvo.ru
https://orcid.org/0000-0003-2182-5477

Вячеслав Борисович Лобанов
кандидат географических наук, заведующий лабораторией
Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
lobanov@poi.dvo.ru
https://orcid.org/0000-0001-9104-5578

Александр Федорович Сергеев
старший научный сотрудник
Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
sergeev@poi.dvo.ru
https://orcid.org/0000-0003-4247-0791

Мария Олеговна Рогинская
студентка
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
mari.dymka@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-5168-5976

Руслана Сергеевна Анохина
студентка
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
rusya.anoxina@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-5081-7620

Юрий Александрович Барабанщиков
научный сотрудник
Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
barabanshchikov.ya@poi.dvo.ru
https://orcid.org/0000-0002-0922-5500

Анна Александровна Рюмина
аспирантка
Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
ryumina.aa@poi.dvo.ru
https://orcid.org/0000-0002-1740-6029

Сергей Григорьевич Сагалаев
научный сотрудник
Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
sagalaev@poi.dvo.ru
https://orcid.org/0000-0002-1831-5209

Мария Геннадьевна Швецова
научный сотрудник
Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
shvetsova.mg@poi.dvo.ru
https://orcid.org/0000-0001-7561-7599

Елена Михайловна Шкирникова
научный сотрудник
Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
elmi@poi.dvo.ru
https://orcid.org/0000-0003-2380-1049

Ольга Анатольевна Уланова
кандидат биологических наук, научный сотрудник
Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
shitkova@poi.dvo.ru
https://orcid.org/0000-0003-4655-1329

Аннотация. В сентябре 2022 г. в кутовой части Ульбанского залива (южная часть зал. Академии) экспедицией ТОИ ДВО РАН на НИС «Профессор Гагаринский» обнаружены значительно превышающие фон концентрации общего фосфора и общего азота, примерно 2,5 и 15 мкмоль/л соответственно. Эти гидрохимические данные, особенности воспроизводства лосося (девятимесячное созревание личинок, скат мальков, др.), с учетом олиготрофного характера зал. Академии и результатов наблюдений за гренландскими китами привели нас к мысли, что основой рациона гренландских китов в данном районе является молодь лососевых рыб. Данное обстоятельство определяет важность сохранения экосистемы зал. Академия, в основе которой лежит устойчивость популяций горбуши и кеты, приходящих на нерест в реки залива. Человеческая деятельность, а именно добыча золота и коксующегося угля, промысел лосося, строительство приливной станции в Тугурском заливе (в случае реализации этой идеи), способна привести к деградации экосистемы залива и уничтожению поголовья гренландских китов.

Ключевые слова: залив Академии, гренландские киты, лосось, эвтрофикация

Для цитирования: Тищенко П.Я., Семкин П.Ю., Тищенко П.П., Лобанов В.Б., Сергеев А.Ф., Рогинская М.О., Анохина Р.С., Барабанщиков Ю.А., Рюмина А.А., Сагалаев С.Г., Швецова М.Г., Шкирникова Е.М., Уланова О.А. Лосось как основа функционирования экосистемы залива

Академии (Охотское море). Возможные угрозы ее деградации // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 2. С. 90–106. http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020098, EDN: ldbvzv

Благодарности. Авторы благодарят В.В. Мельникова за полезную дискуссию, экипаж и научный состав рейсов № 71 и 82 НИС «Профессор Гагаринский» за всестороннюю помощь в экспедиционных исследованиях, администрацию ФГБУ «Заповедное Приамурье» за возможность работы в национальном парке «Шантарские острова».

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, 21–55–53015-ГФЕН и госбюджетных тем 121-21500052-9 и 121021700346-7.

Original article

Salmon as the basis for the functioning of the ecosystem of the Academy Bay (Okhotsk Sea). Possible threats to its degradation

P. Ya. Tishchenko, P. Yu. Semkin, P.P. Tishchenko, V.B. Lobanov, A.F. Sergeev, M.O. Roginskaya, R.S. Anokhina, Yu.A. Barabanshchikov, A.A. Ryumina, S.G. Sagalaev, M.G. Shvetsova, E.M. Shkirnikova, O.A. Ulanova

Pavel Ya. Tishchenko
Doctor of Sciences in Chemistry, Chief Researcher
Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia
tpavel@poi.dvo.ru
https://orcid.org/0000-0002-3500-2861

Pavel Yu. Semkin
Candidate of Sciences in Geography, Senior Researcher
Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia
pahnol@poi.dvo.ru
https://orcid.org/0000-0002-4639-918X

Petr P. Tishchenko
Candidate of Sciences in Geography, Senior Researcher
Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia
eq15@poi.dvo.ru
https://orcid.org/0000-0003-2182-5477

Vyacheslav B. Lobanov
Candidate of Sciences in Geography, Head of the Laboratory
Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia
lobanov@poi.dvo.ru
https://orcid.org/0000-0001-9104-5578

Alexander F. Sergeev
Senior Researcher
Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia
sergeev@poi.dvo.ru
https://orcid.org/0000-0003-4247-0791

Mariya O. Roginskaya
Student

St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
mari.dymka@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-5168-5976

Ruslana S. Anokhina
Student
M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow
rusya.anoxina@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-5081-7620

Yuri A. Barabanshchikov
Researcher
Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia
barabanshchikov.ya@poi.dvo.ru
https://orcid.org/0000-0002-0922-5500

Anna A. Ryumina
Graduate Student
Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia
ryumina.aa@poi.dvo.ru
https://orcid.org/0000-0002-1740-6029

Sergey S. Sagalaev
Researcher
Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia
sagalaev@poi.dvo.ru
https://orcid.org/0000-0002-1831-5209

Mariya G. Shvetsova
Researcher
Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia
shvetsova.mg@poi.dvo.ru
https://orcid.org/0000-0001-7561-7599

Elena M. Shkirnikova
Researcher
Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia
elmi@poi.dvo.ru
https://orcid.org/0000-0003-2380-1049

Olga A. Ulanova
Candidate of Sciences in Biology, Researcher
Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia
shitkova@poi.dvo.ru
https://orcid.org/0000-0003-4655-1329

Abstract. In September 2022, high concentrations of total phosphorus and total nitrogen over background 2.5 and 15 μmol/l, respectively, were found by the expedition of POI FEB RAS on r/v "*Professor Gagarinskiy"* in the apex of the Ulban Bay (southern part of the Academy Bay). These hydrochemical data combined with physiological features of salmon reproduction (nine-month maturation of larvae, rolling of fry, transformation of fry into gregarious pelagic fish, their rapid growth), taking into account of the oligotrophic status of the Academy Bay and the results of observations over bowhead whales, led us to the idea that young salmonid fish are the main food of bowhead whales. The sustainability of the Academy Bay ecosystem strongly depends on the sustainability of pink and chum salmon populations that come to spawn in the rivers of the Academy Bay. Human activity caused by gold and coal mining, salmon fishing and implementation of the idea of creating a tidal power station in the Tugur Bay can lead to degradation of the Academy Bay ecosystem due to destruction of bowhead whales population.

Keywords: the Academy Bay, bowhead whales, salmon, eutrophication

For citation: Tishchenko P. Ya., Semkin P. Yu., Tishchenko P. P., Lobanov V. B., Sergeev A. F., Roginskaya M. O., Anokhina R. S., Barabanshchikov Yu.A., Ryumina A. A., Sagalaev S. G., Shvetsova M.G., Shkirnikova E.M., Ulanova O.A. Salmon as the basis for the functioning of the ecosystem of the Academy Bay (Okhotsk Sea). Possible threats to its degradation. *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(2):90–106. http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020098, EDN: ldbvzv

Acknowledgments. The authors appreciate V.V. Melnikov for invaluable discussion, the crew of R/V *Professor Gagarinskiy* and the scientific groups of the cruises No 71 and 82 for their comprehensive assistance during expeditions and the administration of "Zapovednoe Priamurye" for the opportunity to work in the national reserved area "Shantar Islands".

Funding. This study was partly supported by the Russian Foundation for Basic Research (21-55-53015-a) and Fundamental Programs of POI - 121-21500052-9 and 121021700346-7.

Введение

Акватория Шантарского архипелага является наименее изученной частью Охотского моря. Основной причиной такого состояния дел служат климатические и океанологические особенности этого района. Во-первых, акватория покрывается льдом во второй половине октября и полностью освобождается ото льда в конце июля, т.е. по прошествии девяти месяцев [1]. Во-вторых, здесь имеют место полусуточные приливы, чья высота в заливах Академии, Тугурском и Удской губе, в зависимости от положения Луны, может достигать 6, 10 и 9 м соответственно [1].

Следует отметить, что акватория Шантарского архипелага является эстуарным бассейном благодаря впадающим рекам (рис. 1), наиболее крупные из которых – Уда, Тугур, Усалгин, Сыран, Ульбан со среднегодовым расходом воды 823, 175, 37,4, 10,6, 9,6 $м^3/с$ соответственно [2]. В зал. Академии впадают также мелкие речки: Эльганде, Укурунру, Талги, Талим-1, Талим-2, Иткан. Все крупные и мелкие реки – нерестовые. Кета и горбуша являются основными видами лососевых рыб, которые заходят на нерест в эти реки, как правило, с первой декады июля по первую декаду августа [3–5].

Залив Академии интересен прежде всего тем, что его южная часть (Ульбанский залив, рис. 1) является местом нагула охотоморской популяции гренландских китов (ГК) в летне-осенний период [6–9]. В соответствии с общепринятой точкой зрения основой пищевого рациона ГК считается зоопланктон. Акватория Шантарского архипелага характеризуется большой плотностью мелкого зоопланктона (преобладают копеподы) и рассматривается как один из наиболее высокопродуктивных районов Охотского моря [10]. Биомасса зоопланктона формируется за счет употребления им в пищу фитопланктона, бактериопланктона, растворенного и взвешенного органического вещества [11], однако механизм формирования первичной продукции, который бы обеспечивал ежедневное потребление китом зоопланктона в объеме 1,5–2 т (2% от веса кита) [12], до сих пор неизвестен.

Для выяснения этого вопроса нами были проведены широкомасштабные гидрохимические исследования акватории Шантарского архипелага в июле 2016 г. [13], сентябре 2020 г. [14] и сентябре 2022 г. В отличие от 2016 и 2022 гг., в 2020 г. не выполнялись исследования эстуариев рек Ульбан и Сыран. В период наблюдений 2016 г. в акватории зал. Академии не было обнаружено ни одного ГК; установлено низкое содержание биогенных веществ в реках, впадающих в залив [2, 14]; гидрохимические результаты указывали, что залив был олиготрофным. В сентябре 2020 г. гидрохимические наблюдения проводили после массового нереста лосося, были установлены более высокие концентрации биогенных веществ в зал. Академии. На основе полученных результатов была выдвинута гипотеза, что в рацион ГК может входит лосось, который заходит на нерест в реки Ульбанского залива. После нереста лосось гибнет, и продукты его разложения поступают в речные воды и вершинную часть залива, вызывая цветение фитопланктона и тем самым

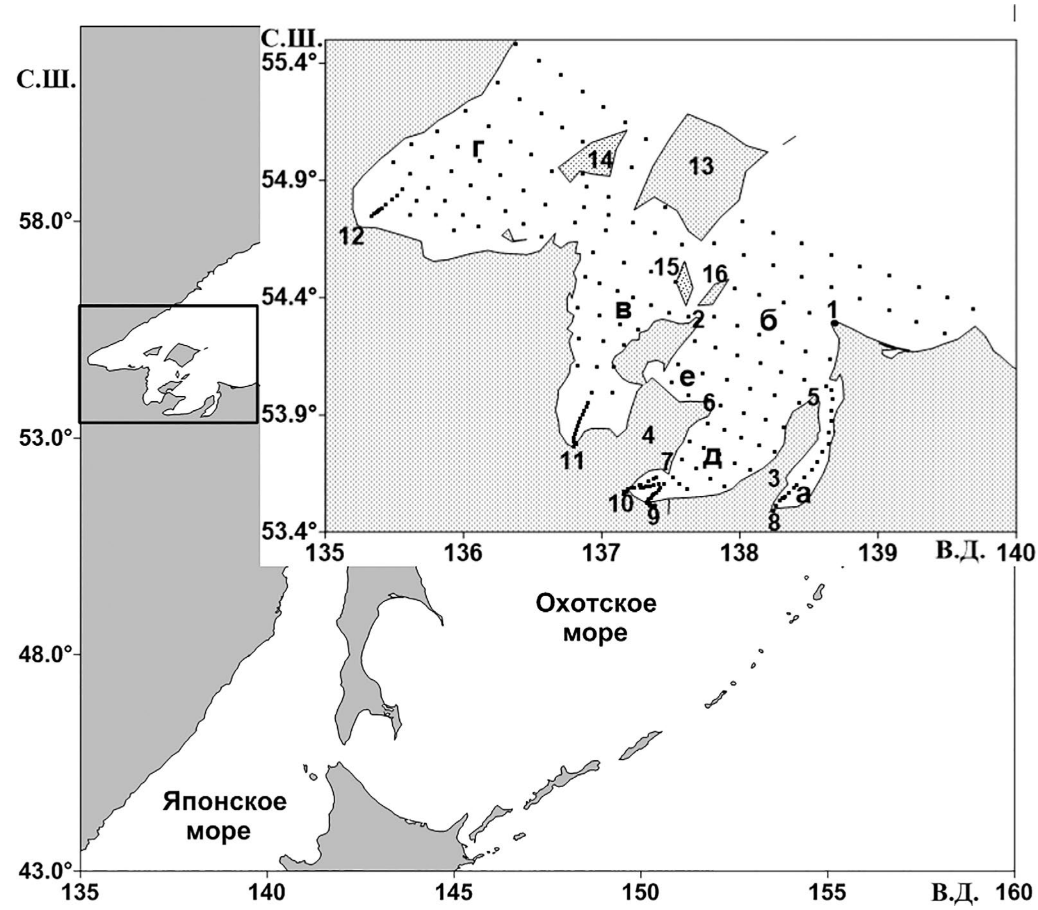


Рис. 1. Географическое положение Шантарского архипелага: *1* – мыс Врангеля, *2* – мыс Сенеки, *3* – п-ов Тохареу, *4* – п-ов Тугурский, *5* – мыс Тукургу, *6* – мыс Укурунру, *7* – коса Бетти, *8* – р. Усалгин, *9* – р. Ульбан, *10* – р. Сыран, *11* – р. Тугур, *12* – р. Уда, *13* – о-в Большой Шантар, *14* – о-в Феклистова, *15* – о-в Малый Шантар, *16* – о-в Беличий, а – зал. Николая, б – зал. Академии, в – зал. Тугурский, г – Удская губа, д – зал. Ульбанский, е – зал. Константина

формируя кормовую базу для развития зоопланктона [14]. Гидрохимические исследования вод Шантарского архипелага, рек и эстуариев в сентябре 2022 г. пришлись на период нагула ГК. Экспедиционные наблюдения проводили существенно позже времени массового нереста лосося. Одной из задач экспедиции было установление возможной роли лосося в формировании кормовой базы китов.

В данной статье приводятся результаты, указывающие на фундаментальную роль лосося в экосистеме зал. Академии и негативные последствия человеческой деятельности, которые могут разрушить эту экосистему.

Район и методы исследования

Акватория Шантарского архипелага расположена в северо-западной части Охотского моря и включает в себя три крупных залива: Академии, Тугурский, Удская губа (рис. 1). Залив Академии глубоко вдается в материк между мысом Врангеля (54°17′ с.ш., 138°40′ в.д.) на востоке и мысом Сенека (54°19′ с.ш., 137°44′ в.д.) на западе. С востока к нему прилегает зал. Николая. Южная и западная части зал. Академии называются соответственно заливами Ульбанский и Константина [1].

Глубины на входе в зал. Академии не превышают 52 м, в его средней части составляют 30–35 м, по мере приближения к берегам уменьшаются постепенно. Грунт представляет собой илистый песок с галькой и раковинами моллюсков. Ульбанский залив ограничен с востока п-овом Тохареу, с запада – п-овом Тугурский. Восточным входным мысом залива является мыс Тукургу, западным – мыс Укурунру. Глубины у входа в залив 30–35 м, в средней его части 25 м, у входа в его вершину 12–14 м. Северный берег вершины зал. Ульбанский на востоке заканчивается косой Бетти (53°39′ с. ш., 137°30′ в. д.). В вершину залива впадает несколько рек, наиболее крупные из которых Сыран и Ульбан длиной 77 и 81 км соответственно [5, 15]. Приливы в заливе неправильные полусуточные, в его вершине их обычная высота 3–6 м. Под влиянием приливов находится более 20 км нижнего течения рек Сыран и Ульбан, имеющих канавоподобные русла с мутной водой.

Экспедиционные работы в зал. Академии выполняли на НИС «Профессор Гагаринский» в июле 2016 г. [13] и сентябре 2022 г. Работы в вершине Ульбанского залива и эстуариях рек Ульбан и Сыран проводили на моторной лодке. Зондирование воды в обеих экспедициях осуществляли зондом SBE19plus V2, оснащенным датчиками температуры, давления, электропроводности (солености), растворенного кислорода (DO), флюоресценции хлорофилла-а, мутности, фотосинтетически активной радиации (ФАР) в комплекте с пробоотборной системой SBE-55 из 6 батометров объемом 4 л каждый. Дополнительно в 2016 г. изучали эстуарии рек Сыран (14 июля) и Ульбан (26 июля), а в 2022 г. – Сыран (14 сентября), Ульбан (15 сентября) и Тугур (17 сентября) в соседнем Тугурском заливе (рис. 1, рис. 2, *б*). Отбирали воду для анализа на следующие гидрохимические параметры: соленость, DO, pH, общую щелочность (TA), хлорофилл-а, растворенный органический углерод (РОУ) и гумусовое вещество, биогенные вещества (фосфаты, силикаты, нитраты, нитриты, ион аммония, общий азот, общий фосфор). Методики измерения гидрохимических параметров приведены в работе [14].

Дополнительно в октябре–ноябре 2021 г. проведены эксперименты по разложению туш кеты в речных водах. Свежевыловленную рыбозаводом кету из р. Барабашевка Приморского края (два самца с молоками и одна самка с икрой, общим весом 8 кг) помещали в пластиковую бочку объемом 200 л, полностью наполненную речной водой. Бочка находилась в прохладном темном месте. Вода непрерывно принудительно аэрировалась со дна мощной аквариумной помпой. В течение экспозиции пробы воды отбирали для анализа РОУ, неорганического и общего фосфора, общего азота.

Результаты

Акватория зал. Академии, в особенности кутовая часть Ульбанского залива, является местом нагула ГК, как правило, в августе–сентябре [6, 7, 9, 16]. В 2016 и 2022 гг. нами изучались эстуарии р. Сыран и Ульбан. Точки отбора проб в эстуариях и места встреч с ГК в 2022 г. показаны на рис. 2, *а*. В июле 2016 г. в кутовой части Ульбанского залива наблюдали стадо из 100–150 белух, но не было зарегистрировано ни одного ГК. В сентябре 2020 г. встретился только один ГК в небольшой бухте, прилегающей к мысу Врангеля (рис. 1). В сентябре 2022 г. в мористой части эстуария р. Сыран отмечено 23 ГК, а в эстуарии р. Тугур – 9 (рис. 2). Для обеспечения пищей ГК требуется высокая первичная продукция (ПП) фитопланктона, служащего пищей зоопланктону [11]: фитопланктон → зоопланктон → ГК (1).

Одно из необходимых условий высокой ПП акватории зал. Академии является высокая концентрация биогенных веществ. Сравнительное распределение общего фосфора (P_{tot}) и общего азота (N_{tot}) для двух сезонов – лета 2016 г. и осени 2022 г. –

Рис. 2. Расположение гидролого-гидрохимических станций (кружки) в кутовой части Ульбанского (а) и Тугурского (б) заливов. Треугольником отмечены места встреч с гренландскими китами в Ульбанском (23, 9 и 9 животных утром и в полдень 14.09.2022 г. и вечером 15.09.2022 г. соответственно) и Тугурском (9 животных утром 17.09.2022 г.) заливах

приведено на рис. 3, 4. Из рисунков следует, что существуют два основных источника биогенных веществ. Один из них – открытая часть Охотского моря, адвекция придонных вод которого в залив с последующим приливным перемешиванием обусловливает осенью высокие, нежели в летний период, концентрации N_{tot} [14] (рис. 4). Для P_{tot} этот эффект менее выражен (рис. 3). Другой источник P_{tot} и N_{tot} обнаружен в эстуарной зоне, в вершине Ульбанского залива. Опять же, его значение было бóльшим в сентябре, чем в июле (рис. 3, 4). В работе [14] было сделано

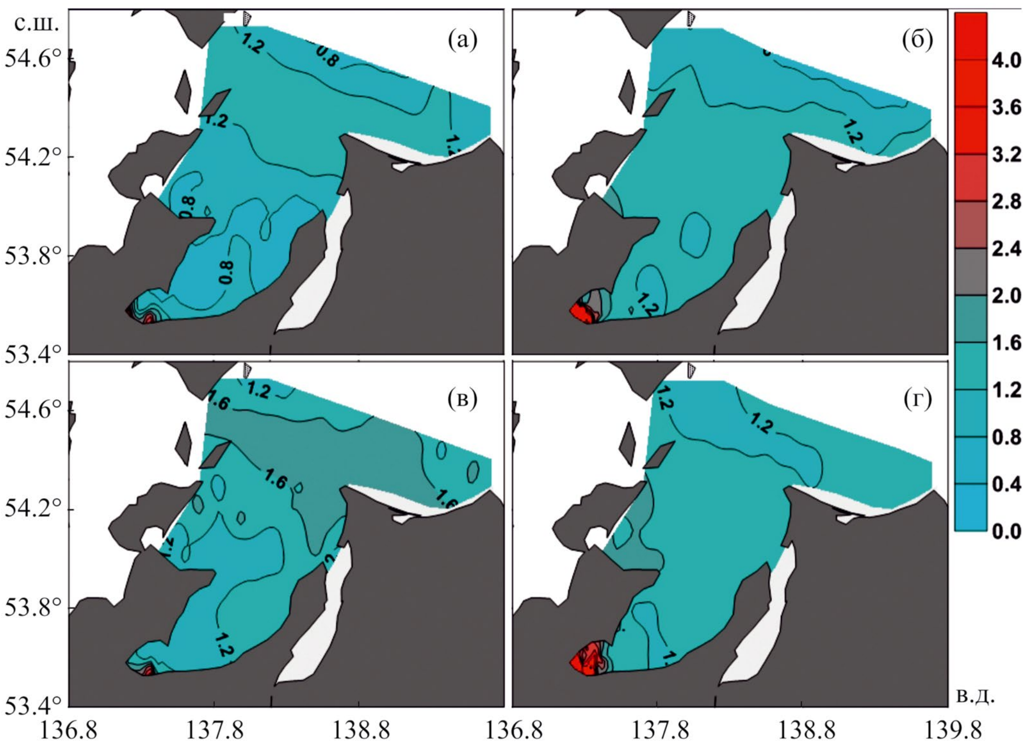


Рис. 3. Распределение концентрации P_{tot} (мкмоль/л) в зал. Академии в июле 2016 г. (а, в) и сентябре 2022 г. (б, г) в поверхностном (а, б) и придонном (в, г) слоях воды

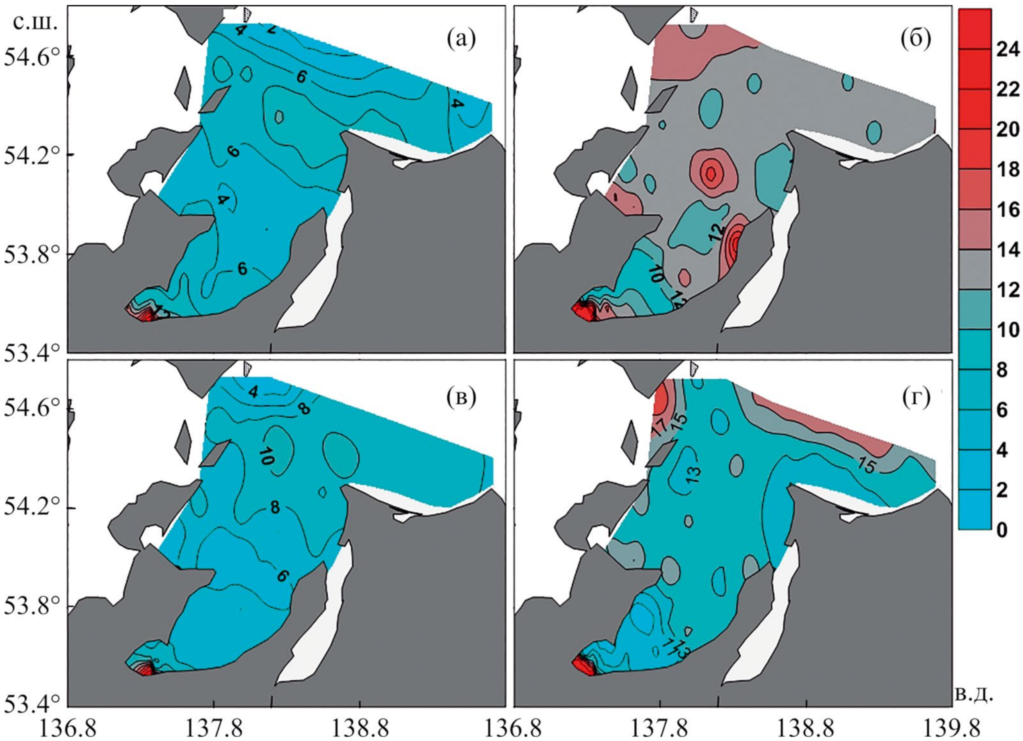


Рис. 4. Распределение концентрации N_{tot} (мкмоль/л) в зал. Академии в июле 2016 г. (а, в) и сентябре 2022 г. (б, г) в поверхностном (а, б) и придонном (в, г) слоях воды

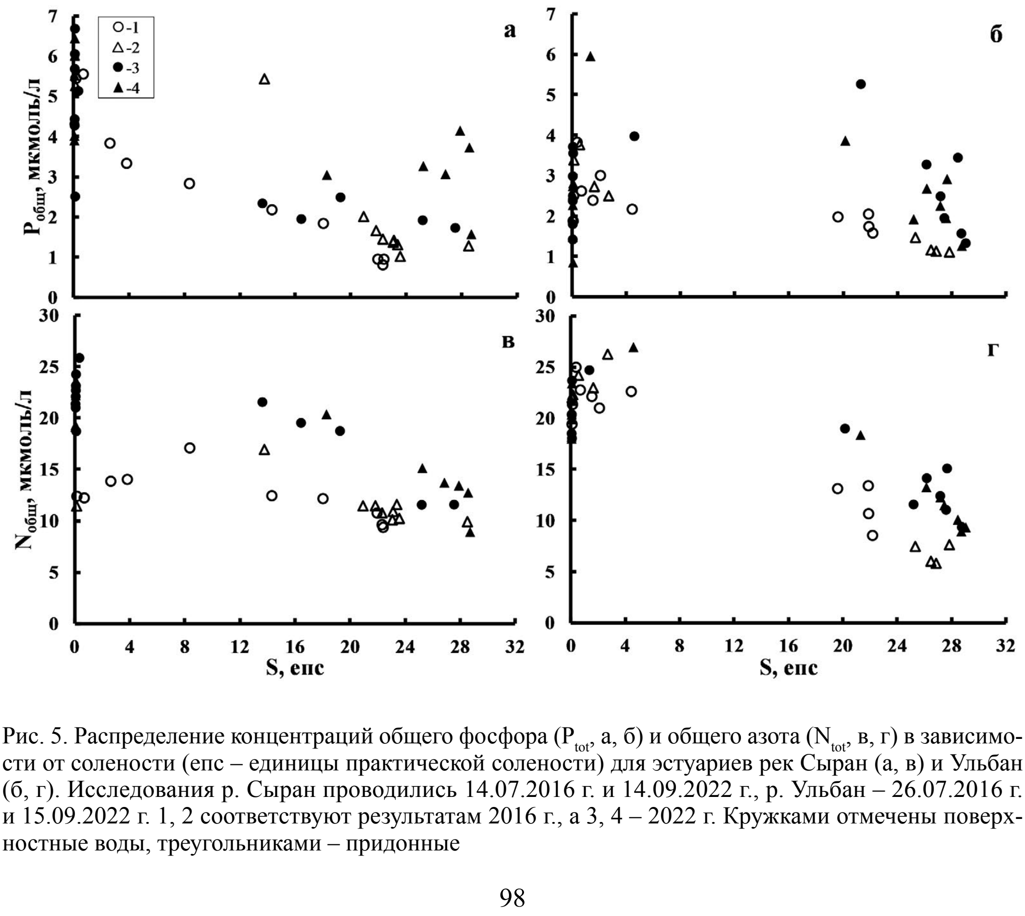


Рис. 5. Распределение концентраций общего фосфора (P_{tot}, а, б) и общего азота (N_{tot}, в, г) в зависимости от солености (епс – единицы практической солености) для эстуариев рек Сыран (а, в) и Ульбан (б, г). Исследования р. Сыран проводились 14.07.2016 г. и 14.09.2022 г., р. Ульбан – 26.07.2016 г. и 15.09.2022 г. 1, 2 соответствуют результатам 2016 г., а 3, 4 – 2022 г. Кружками отмечены поверхностные воды, треугольниками – придонные

предположение, что поступающие в кутовую часть залива биогенные вещества могут быть продуктами разложения погибшего после нереста лосося. Сравнение результатов измерений P_{tot} и N_{tot}, выполненных летом (июль) 2016 г. и осенью (сентябрь) 2022 г. в эстуариях рек Сыран и Ульбан, показано на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что для эстуария р. Сыран концентрации P_{tot} и N_{tot} были, как правило, систематически выше в 2022 г., чем в 2016 г. Этот результат мы объясняем тем, что в июле 2016 г. нерест лосося только начался [4] и биогенные вещества из разлагающихся туш производителей не обогатили речные воды. В сентябре 2022 г. нерест лосося в основном завершился, речные воды были обогащены P_{tot} и N_{tot} примерно в 1,5–2 раза. Результаты измерений концентраций P_{tot} и N_{tot} в речной части эстуария р. Ульбан не показали систематическую разницу между летним (2016 г.) и осенним (2022 г.) сезонами. Скорее наоборот, концентрации биогенных веществ в речной части эстуария р. Ульбан в июле 2016 г. были выше, чем в сентябре 2022 г. В июле 2016 г. исследования эстуария р. Ульбан проводились на 12 дней позже, чем в р. Сыран. По нашему мнению, эта задержка оказалась достаточной для обогащения биогенами из разложившегося лосося вод Ульбана, но не достаточной для обогащения мористой части его эстуария. Экспериментальные исследования по разложению лосося, представленные на рис. 6, показывают, что в воде в течение двух недель концентрация РОУ увеличилась до 170 мгС/л, а неорганического фосфора, общего азота и общего фосфора – соответственно до 700, 29 600 и 2600 мкмоль/л. Скорость микробиологического разложения достаточно велика. В течение двух недель масса лосося уменьшилась примерно в 1,5 раза. Полную кинетическую кривую разложения кеты нам не удалось получить из-за чрезвычайно отвратительного запаха, обусловленного выделяющимися ядовитыми диаминами. Разложение лосося в конечном итоге приводит к увеличению продукции не только первого звена пищевой цепи, но и второго. Схематично это можно представить цепочкой: лосось → бактериопланктон → PO_4^{3-}, NH_4^+, NO_3^- → фитопланктон → зоопланктон → ГК (2).

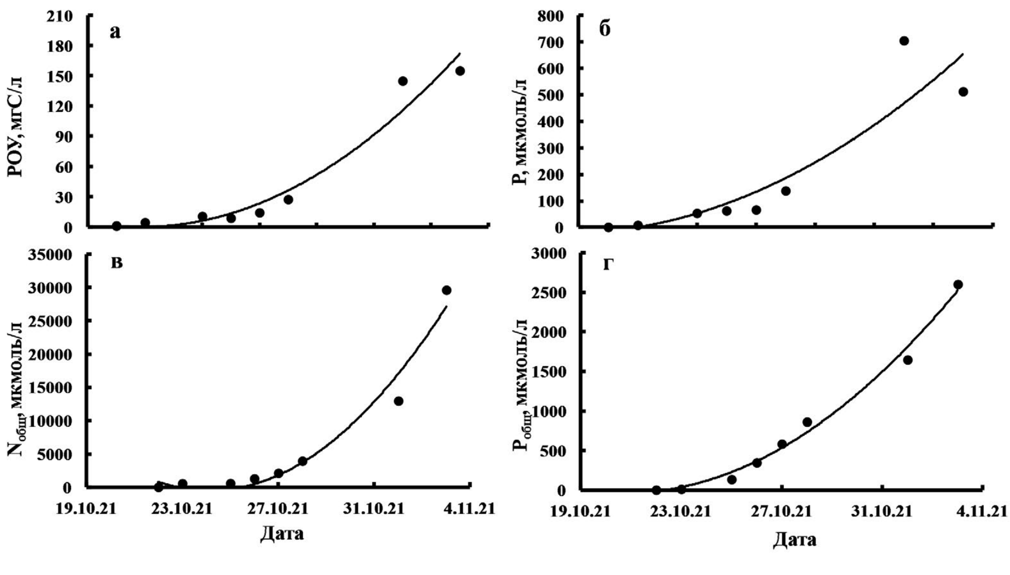


Рис. 6. Рост концентраций растворенного органического углерода (а), неорганического фосфора (б), общего азота (в) и общего фосфора (г) в речной воде в зависимости от времени (8 кг свежевыловленной кеты в 200 л воды из р. Барабашевка)

Обсуждение

Акваторию зал. Академии в летний сезон можно отнести к олиготрофному бассейну [14]. Концентрации биогенных веществ здесь в сентябре выше, чем в июле (рис. 4, [14]), и такое увеличение обусловлено, на наш взгляд, муссонным климатом. Летние паводки на реках в летний сезон формируют поток поверхностных вод из залива в открытую часть Охотского моря, что вызывает компенсационный поток придонных вод из открытой части моря, поставляющий биогенные вещества в зал. Академии, поскольку их концентрации выше в придонных водах. В период ледостава, в конце октября [1], начинается зимняя межень на реках, происходит более резкое охлаждение вод, чем в открытой части Охотского моря, что приводит к уменьшению уровня воды в зал. Академии. В этот период следует ожидать поступления поверхностных вод из открытой части Охотского моря и, как противоток, придонных вод из залива в открытую часть моря, что должно приводить к уменьшению концентрации биогенных веществ. Эти процессы влияют на сезонную изменчивость ПП и, соответственно, на продукцию зоопланктона в северной и центральной частях зал. Академии. Однако местом нагула ГК является южная часть зал. Академии – Ульбанский залив [6–8, 16] (именно в его вершине наблюдаются высокие концентрации P_{tot} и N_{tot} в осенний сезон).

Существует несколько путей поступления биогенных веществ в мористую часть эстуариев рек Сыран и Ульбан: а) естественный речной поток (фоновый); б) дополнительный поток, обусловленный разложением туш лосося после нереста и на подходе к реке для нереста; в) миграция молоди лосося из реки в море.

Для оценки природных концентраций P_{tot} и N_{tot} были использованы данные самой длинной в регионе р. Уда. (457 км) [15]. Предполагалось, что лосось поднимается вверх по течению реки на несколько сотен километров, поэтому в ее нижнее течение и прибрежную зону не попадают биогенные вещества, образующиеся в результате разложения погибшего лосося. Таким образом, годовые естественные потоки P_{tot} и N_{tot}, поставляемые реками Ульбан и Сыран в кутовую часть Ульбанского залива, были рассчитаны из средних значений концентраций P_{tot} и N_{tot}, полученных в речной воде р. Уды летом 2016 г. и осенью 2022 г., а также среднегодовых значений расхода рек Сыран и Ульбан [2] и составили 8,5 и 141 т/год соответственно.

Поток биогенных веществ, поставляемых разложившимися тушами лосося после нереста, можно оценить на основе данных о количестве нерестящихся рыб в реках Сыран и Ульбан. С.Ф. Золотухин [17] и А.Н. Канзепарова [5] установили площади нерестовых участков кеты и горбуши и количество производителей на 100 м^2 на нерестилище. Используя эту информацию, было подсчитано, что в среднем погибает около 980 и 1800 т/год лосося соответственно.

Следует также отметить, что при подходе лосося на нерест его встречают млекопитающие: зубатые киты (белухи и косатки) и тюлени (лахтак, кольчатая нерпа, ларга) [18]. Количество белух в Ульбанском заливе может достигать 2300 особей [19], косаток, которые питаются не только рыбой, но и тюленями – до 30 особей [19]. Данные по другим млекопитающим более скудные. В экспедиции 2022 г. в эстуарии р. Сыран нами было зафиксировано около 300 тюленей, лежащих на осушке. Если принять, что каждая взрослая особь съедает в сутки рыбы в количестве 1,5–2% от массы своего тела, то в течение месячного хода рыбы зубатыми китами и тюленями будет употреблено в пищу около 2100 т лосося. Примерно десятая часть съеденной рыбы расходуется на увеличение биомассы животных, а оставшаяся в форме экскрементов выделяется в среду. Общая биомасса лосося, которая может превратиться в биогенные вещества (мертвая рыба после нереста и съеденная млекопитающими), составляет около 3000 т. Согласно содержанию питательных веществ в биомассе лосося [20], была выведена следующая формула для органического вещества: $(CH_2O)_{61}(NH_3)_{12}H_3PO_4$. Согласно ей дополнительный экспорт питательных веществ в вершину Ульбанского залива составляет 4,5 и 23,6 т общего фосфора и азота соответственно. Эти потоки в 6 раз меньше природных годовых потоков биогенных веществ, поставляемых реками Ульбан и Сыран в Ульбанский залив. Но эти потоки биогенных веществ имеют место в короткий промежуток времени, т.е. носят импульсный характер. Если оцененные таким образом потоки P_{tot} и N_{tot} равномерно распределить в водной среде кутовой части Ульбанского залива, ограниченной косой Бетти, то концентрации P_{tot} и N_{tot} увеличатся на $6{,}0 \cdot 10^{-8}$ и $7{,}2 \cdot 10^{-7}$ моль/л соответственно, что не скажется заметно на результатах прямых измерений их концентраций. Показанная на рис. 3, 4 обогащенная биогенными веществами область составляет примерно четвертую часть от области, ограниченной косой Бетти. Расчет количества биогенных веществ только для этой части акватории Ульбанского залива дает увеличение их концентраций, равное $4{,}7 \cdot 10^{-7}$ и $5{,}6 \cdot 10^{-6}$ моль/л для P_{tot} и N_{tot} соответственно. Такое увеличение можно зафиксировать аналитическими методами, однако эти величины значительно меньше наблюдаемых превышений над фоном, которые составляют примерно $2{,}5 \cdot 10^{-6}$ и $15 \cdot 10^{-6}$ моль/л P_{tot} и N_{tot} (рис. 3, 4).

Что касается миграции молоди лосося из реки в море, то, по данным нерестового фонда рек Сыран и Ульбан [17], ежегодно в них в среднем рождается $5 \cdot 10^8$ мальков. Начальная масса мигрирующей молоди лосося составляет около 0,2–0,3 г, которая со временем значительно увеличивается. Общее поступление биомассы молоди лосося из реки в море составляет около 10 т в пересчете на сухое органическое вещество, или 0,15 т P_{tot} и 0,79 т N_{tot}. Если предположить, что половина молоди будет съедена хищниками, то образовавшиеся в результате метаболизма биогенные вещества внесут незначительный вклад в увеличение концентрации биогенных веществ в вершине Ульбанского залива.

Из вышеприведенных оценок следует, что наблюдаемое обогащение кутовой части Ульбанского залива P_{tot} и N_{tot} (рис. 3, 4) нельзя в полной мере объяснить погибшим лососем на подходе к реке, и тем, который отнерестился, и мелкой молодью лосося. Также пищевая цепь, предложенная схемами (1) и (2), не обеспечивает кормовую базу 23 китам, которых мы наблюдали осенью 2022 г. в мористой части эстуария р. Сыран (рис. 3). Последний вывод следует из результатов оценки ПП фитопланктона для акватории южнее косы Бетти (рис. 1), которая менее 500 мг С/(м^2 · сут) [21]. Максимальная продукция для площади 5 км^2, на которой были обнаружены 23 ГК, обеспечивает пищей 1–2 китов.

Существует иной вариант объяснения наблюдаемым высоким значениям P_{tot} и N_{tot} в вершине Ульбанского залива, а также источника питания ГК. Нами предложена гипотеза, в соответствии с которой основной кормовой базой ГК в Ульбанском заливе являются подросшие мальки лосося. Инкубационный период икры кеты и горбуши для холодного климата может составлять 130–150 сут. После выклева личинки остаются в гнездах до весны [22]. В среднем рождается $5 \cdot 10^8$ мальков горбуши и кеты в реках Сыран и Ульбан. Эта величина от года к году сильно меняется: например, количество производителей горбуши в нечетные годы на нерестилище могло достигать 30 шт./100 м^2, а в четный неурожайный год – только 2 шт./100 м^2. В наших оценках количество производителей для горбуши составляет 16 шт./100 м^2, а для кеты – 12 шт./100 м^2 [17]. По-видимому, в конце мая – начале июня, после вскрытия рек ото льда и очищения от него кутовой части Ульбанского залива, мальки горбуши и кеты размером 3,5 см и весом 0,2 г начинают скатываться к устью рек. В период ската организм мальков лосося перестраивается, т.е. происходит его смолтификация. Следует отметить, что 20-километровые низовья рек

Ульбан и Сыран представляют собой приливно-отливные бассейны, заполненные мутной водой, что способствует сохранению мальков от хищников и питанию бентосными организмами. Соленость в этом приливно-отливном бассейне (до бара реки) меняется в пределах 0–20‰, что способствует адаптации молоди к жизни в море. При попадании в эстуарную часть бассейна (после бара реки) мальки горбуши и кеты превращаются в стайных рыбок, размеры стай могут достигать сотен тысяч особей [22]. Прибрежный период жизни молоди охватывает 1,5–2 мес. С увеличением длины тела и веса мальки переходят на пелагический тип питания (мелкий зоопланктон), постепенно отходят от береговой черты. В августе сеголетки горбуши весят до 4 г и отходят от береговой черты на 2 мили [22, 23]. Примерно на этом расстоянии от береговой черты в экспедиции 2022 г. были обнаружены ГК в мористой части эстуариев р. Сыран и Тугур (рис. 2). В сентябре средний размер и вес сеголеток горбуши достигает 18 см и 61 г соответственно, и они мигрируют в открытую часть моря, а в октябре–ноябре покидают Охотское море через Курильские проливы [22, 23]. Авторы цитируемых выше работ описывают для молоди кеты примерно тот же сценарий ската из реки в эстуарий, накопления веса в эстуарной части с последующим отходом в мористую часть и миграцией в открытую часть моря, а затем в Тихий океан в октябре–ноябре. Для мальков кеты может быть характерна большая неравномерность размера и веса, чем у мальков горбуши. Если предположить, что ГК поедают только 50% от всей молоди мальков со средним весом особи 20 г, то суммарные «избыточные» над фоном концентрации P_{tot} и N_{tot} в кутовой части Ульбанского залива составят $1{,}3 \cdot 10^{-6}$ и $15 \cdot 10^{-6}$ моль/л соответственно. Эти оценки «избыточных» концентраций по порядку величины соответствуют нашим наблюдениям (рис. 3, 4). Более того, такая биомасса молоди (около 5000 т) способна обеспечить питание 23 ГК в течение более 4 мес. Следует также отметить, что временна́я неравномерность ската мальков, их роста [22], на наш взгляд, обеспечивает ГК кормовой базой в течение 1,5–2 мес.

Несмотря на высокую неопределенность вышеприведенных оценок, они указывают, что сеголетки горбуши и кеты могут служить устойчивой кормовой базой для ГК и в условиях интенсивного роста могут обеспечить пищей существенно больше ГК. Максимальное количество ГК, которое мы наблюдали в эстуарии р. Сыран, составляло 23 особи. Следует отметить, что здесь рассмотрены только две реки. Площадь нерестилищ в р. Усалгин, которая впадает в кутовую часть зал. Николая, примерно равна суммарной площади рек Ульбан и Сыран [17]. Суммарная площадь нерестилищ более мелких рек соответствует площади нерестилищ р. Сыран. Таким образом, молодь лосося зал. Академии способна обеспечить питание 50–60 китов в течение летне-осеннего нагула. Именно такое количество китов приходит кормиться в зал. Академии в этот период [7, 8]. В исследованных желудках ГК наряду с зоопланктоном обнаруживались рыбки размером до 8 см [24, 25], что является косвенным аргументом в пользу нашей гипотезы. Следует отметить, что высокая концентрация пищи, необходимая ГК, вполне обеспечивается многочисленной молодью лосося. Это также объясняет, почему ГК предпочитают питание в зал. Академии на глубинах 4–7 м, а не в северной части залива, где глубина бассейна более 40 м, а ПП фитопланктона превышает 2700 мг С/(м^2 · сут), т.е. в пять раз выше в сравнении с кутовой частью Ульбанского залива [21].

На вершине пищевой цепи экосистемы зал. Академии находятся такие прекрасные млекопитающие, как ГК, белухи, косатки, тюлени. Основой потоков вещества и энергии в экосистеме залива является лосось. Лососевые на разных стадиях жизненного цикла обеспечивают питанием разные уровни пищевой цепи, в том числе ГК. Угроза благополучному существованию данной группы рыб может привести к необратимой деградации экосистемы залива.

Активизация человеческой деятельности в акватории Шантарского архипелага вызывает тревогу за судьбу этого края. Нам известно, что в верховьях р. Ульбан добывается золото старательской артелью «Восток». Золото мелкодисперсное, и артель его концентрирует на месте, что может негативно сказаться на поголовье лосося в этой реке. Действительно, показания эхолота нашей лодки во время изучения р. Сыран указывали на обилие рыбы в реке как в 2016, так и в 2022 г. В р. Ульбан в 2016 г. рыба также была, но осенью 2022 г. эхолот указывал на ее отсутствие, которое можно объяснить старательским промыслом. Другим событием, вызывающим тревогу, является введение в сентябре 2022 г. в эксплуатацию Кутынского месторождения золота, расположенного на Тугурском полуострове («Кутынская горно-геологическая компания», учредитель – ОАО «Полиметалл УК»). Обогащение руды проводится «кучным методом», т.е. порошок руды взаимодействует с оксидом кальция, цианидными растворами, которые переводят золото в растворенную форму (процесс Меррилл – Кроу). Очевидно, что любая, даже небольшая авария может привести к непоправимым экологическим последствиям. Дополнительно «пришла беда, откуда не ждали»: планируется строительство угольного терминала в районе мыса Манорский – порт Эльга (Удская губа). Очевидно, что перегрузка угля с вагонов на суда будет сопровождаться загрязнением угольной пылью окружающей среды, в чем общественность полностью убедилась на примере порта Восточный в бухте Врангеля (зал. Находка). Угольная пыль не является инертной, она оказывает негативное влияние на все трофические уровни морской экосистемы [26]. Активизация рыболовства, золотодобывающей и угольной промышленности в районе Шантарского архипелага, а также создание приливной станции в Тугурском заливе может привести к резкому сокращению численности лосося и исчезновению ГК. Уже сейчас требуется постоянный экологический контроль этой уникальной акватории, включающий наблюдения за миграцией лосося из Охотского моря в реки, впадающие в заливы Шантарского архипелага, а также регулярный учет количества и путей миграции ГК.

Заключение

Установлено, что в осенний сезон (сентябрь) концентрации общего азота и общего фосфора в эстуарных водах рек Ульбан и Сыран были выше в 1,5–2 раза, чем в летний (июль) сезон. В сентябре 2022 г. в кутовой части Ульбанского залива наблюдалось превышение содержания общего фосфора и общего азота над фоном примерно на 2,5 и 15 мкмоль/л соответственно, что согласуется с результатами наблюдений, выполненных нами в сентябре 2020 г. [14]. Повышенные концентрации общего фосфора и общего азота в осенний сезон в сравнении с летним сезоном обусловлены минерализацией экскрементов, выделяемых млекопитающими (белухами, косатками, тюленями), питающимися идущим на нерест лососем, минерализацией туш погибшего после нереста лосося и минерализацией экскрементов, выделяемых ГК, питающимися сеголетками кеты и горбуши. К такому выводу нас подводят многочисленные публикации по зафиксированным встречам с белухами, тюленями, ГК в кутовой части Ульбанского залива, а также собственные наблюдения за этими животными. Аномалии концентраций биогенных веществ, особенности жизненных циклов лососей (девятимесячное созревание личинок, сроки ската мальков, превращение мальков в стайных пелагических рыбок, их быстрый рост), олиготрофный характер залива и результаты наблюдений за ГК утверждают нас в мысли, что дополнительным источников пищи для ГК является молодь лосося. Устойчивость экосистемы зал. Академии определяется устойчивостью популяций приходящих на нерест горбуши и кеты. Развитие хозяйственной деятельности, в частности добычи золота и коксующегося угля, промысла рыбы (лосося), а также возможная реализация идеи создания приливной станции в Тугурском заливе вызывают тревогу за сохранение поголовья краснокнижных млекопитающих. По мнению авторов данной статьи, все экономические выгоды от освоения Шантарского архипелага не стоят той гармонии, которая сейчас пока еще существует на этой акватории. Она нуждается в нашей защите. Мы считаем, что национальный парк «Шантарские острова» должен расшириться не только на все акватории основных заливов – Удской губы, Тугурского, Академии, но также на акватории рек, впадающих в них. Запрет на хозяйственную деятельность не должен касаться рыбного и охотничьего промысла, осуществляемого коренными жителями, населяющими этот прекрасный парк, что предусмотрено законами РФ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лоция Охотского моря. Вып. 2. Северная часть моря. М.: Изд-во УНГС ВМФ СССР, 1960. 200 с.

2. Semkin P. Yu., Tishchenko P. Ya. Pavlova G. Yu., Tishchenko P.P., Sagalaev S.G., Shkirnikova E.M., Shvetsova M.G. The carbonate system of estuaries of the Syran and Ulban rivers (Ul'banskii Bay of the Okhotsk Sea) during spring flood // Water Resources. 2022. Vol. 49, N5. P. 869–879. DOI: 10.31857/S0321059622050145.

3. Иванков В.Н., Иванкова Е.В., Кульбачный С.Е. Внутривидовая экологическая и темпоральная дифференциация у тихоокеанских лососей. Эколого-темпоральные расы и темпоральные популяции кеты *Oncorhynchus keta* // Изв. ТИНРО. 2010. Т. 163. С. 91–105.

4. Кульбачный С.Е. Экология и структура популяций кеты северо-западной части континентального побережья Охотского моря: дис. … канд. биол. наук. Владивосток, 2010. 148 с.

5. Канзепарова А.Н. Особенности биологии и современное состояние запасов горбуши (*Oncorhynchus gorbuscha*) северо-западного побережья Охотского моря: дис. … канд. биол. наук. Владивосток, 2018. 148 с.

6. Rogachev K.A., Carmack E.C., Foreman M.G.G. Bowhead whales feed on plankton concentrated by estuarine and tidal currents in Academy Bay, Sea of Okhotsk // Cont. Shelf Res. 2008. Vol. 28. P. 1811–1826. URL: https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.04.014.

7. Melnikov V.V., Fedorets Yu.V. The distribution of zooplankton and bowhead whales, *Balaena mysticetus* Linnaeus, 1758, in Akademiya Bay, Sea of Okhotsk // Russ. J. Mar. Biol. 2016. Vol. 42, N3. P. 216–221. DOI: 10.1134/S106307401603007X.

8. Шпак О.В., Парамонов А.Ю. Наблюдения за гренландскими китами (*Balaena mysticetus*) в Шантарском регионе Охотского моря; потенциальные угрозы для восстановления численности популяции // Морские млекопитающие Голарктики. 2015. Т. 2. С. 334–342.

9. Shpak O.V., Paramonov A. Yu. The bowhead whale, Balaena mysticetus Linnaeus, 1758, in the western Sea of Okhotsk (2009–2016): distribution pattern, behavior, and threats // Russ. J. Mar. Biol. 2018. Vol. 44, N3. P. 210–218. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063074018030082

10. Волков А.Ф. Интегральные схемы количественного распределения массовых видов зоопланктона дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана по среднемноголетним данным (1984–2006 гг.) // Изв. ТИНРО. 2008. Т. 154. С. 135–143.

11. Steinberg D.K., Landry M.R. Zooplankton and the ocean carbon cycle // Annu. Rev. Mar. Sci. 2017. Vol. 9. P. 413–444. DOI: 10.1146/annurev-marine-010814–015924.

12. Reilly S., Hedley S., Borberg J., Hewitt R., Thiele D., Watkins J., Naganobu M. Biomass and energy transfer to baleen whales in the South Atlantic sector of the Southern Ocean // Deep-Sea Research. Pt. II. 2004. Vol. 51. P. 1397–1409. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.06.008.

13. Tishchenko P. Ya., Lobanov V.B., Shul'kin V.M., Melnikov V.V., Tsoy I.B., Tishchenko P.P., Bannov V.A., Belous O.V., Vasileva L.E., Elovskaya O.A., Sagalaev S.G., Fedorets Yu.V. Comprehensive research of the coastal water area of the Sea of Japan and Sea of Okhotsk under the influence of river runoff (cruise 71 of the R/V Professor Gagarinskii) // Oceanology. 2018. Vol. 58, N2. P. 325–327. DOI: 10.7868/S0030157418020193.

14. Tishchenko P. Ya., Lobanov V.B., Tishchenko P.P., Semkin P. Yu., Sergeev A.F., Anisimova A.A., Barabanshchikov Yu.A., Melnikov V.V., Ryumina A.A., Sagalaev S.G., Ulanova O.A., Shvetsova M.G., Shkirnikova E.M. Hydrochemical study of Academy Bay (Sea of Okhotsk) // Oceanology. 2022. Vol. 62, N1. P. 80–92. DOI: 10.31857/S0030157422010166.

15. Semkin P. Yu., Tishchenko P. Ya., Pavlova G. Yu., Sagalaev S.G., Tishchenko P.P., Khodorenko N.D., Shkirnikova E.M., Shvetsova M.G. Effect of river runoff on the hydrochemical characteristics of water in Udskaya Bay and Nikolaya Bay (the Sea of Okhotsk) in summer // Oceanology. 2021. Vol. 61, N3. P. 338–350. DOI: 10.31857/S0321059622050145.

16. Ivashchenko Yu., Clapham Ph. Bowhead whales *Balaena mysticetus* in the Okhotsk Sea // Mammal Rev. 2010. Vol. 40, N1. P. 65–89. DOI: 10.1111/j.1365–2907.2009.00152.x.

17. Золотухин С.Ф. Предварительная оценка нерестового фонда кеты и горбуши Тугуро-Чумиканского района (Охотское море) // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. 2005. Вып. 3. С. 622–628.

18. Шпак О.В., Парамонов А.Ю. Наблюдения за белухами (*Delphinapterus leucas*), косатками (*Orcinus orca*), гладкими китами (Balaenidae) в Ульбанском заливе Охотского моря // Морские млекопитающие Голарктики. 2012. Т. 2. С. 395–400.

19. Shpak O.V., Meschersky I.G., Glazov D.M., Litovka D.I., Kuznetsova D.M., Rozhnov V.V. Structure and assessment of beluga whale, *Delphinapterus leucas*, populations in the Russian Far East // Mar. Fish. Rev. 2020. Vol. 81, N3–4. P. 72–86.

20. Jonsson B., Jonsson N. Migratory Atlantic salmon as vectors for the transfer of energy and nutrients between freshwater and marine environments // Freshwater Biology. 2003. Vol. 48. P. 21–27. DOI: https://doi.org/10.1046/j.1365–2427.2003.00964.x.

21. Tishchenko P.P., Tishchenko P. Ya., Semkin P. Yu., Shvetsova M.G. Phytoplankton primary production in the coastal water surrounding Shantar Archipelago // Russ. J. Mar. Biol. 2023. Vol. 49, N1. P. 47–55.

22. Шунтов В.П., Темных О.С. *Тихоокеанские лососи в морских и океанических экосистемах. Т. 1. Владивосток: ТИНРО-Центр, 2008. 481 с.*

23. Волобуев В.В., Марченко С.Л. Тихоокеанские лососи континентального побережья Охотского моря (биология, популяционная структура, динамика численности, промысел). Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2011. 303 с.

24. Lowry L., Frost K.J. Foods and feeding of bowhead whales in western and northern Alaska // Sci. Rep. Whales Res. Inst. 1984. N35. P. 1–16.

25. Lowry L.F., Sheffield G., George J.C. Bowhead whale feeding in the Alaskan Beaufort Sea, based on stomach contents analysis // J. Cetacean Res. Manage. 2004. Vol. 6, N3. P. 215–223.

26. Tretyakova M.O., Vardavas A.I., Vardavas C.I., Iatrou E.I., Stivaktakis P.D., Burykina T.I., Mezhuev Y.O., Tsatsakis A.M., Golokhvast K.S. Effects of coal microparticles on marine organisms: A review // Toxicology Reports. 2021. Vol. 8. P. 1207–1219. DOI: 10.1016/j.toxrep.2021.06.006.

REFERENCES

1. Lotsiya Okhotskogo morya. 2. Severnaya chast’ morya = [Navigation in the Sea of Okhotsk, the Northern Part of the Sea]. Moscow: Directorate of the Chief of the Hydrographic Service of the Soviet Navy; 1960. 200 p. (In Russ.).

2. Semkin P. Yu., Tishchenko P. Ya. Pavlova G. Yu., Tishchenko P.P., Sagalaev S.G., Shkirnikova E.M., Shvetsova M.G. The carbonate system of estuaries of the Syran and Ulban rivers (Ul’banskii Bay of the Okhotsk Sea) during spring flood. *Water Resources*. 2022;49(5):869–879. DOI: 10.31857/S0321059622050145.

3. Ivankov V.N., Ivankova E.V., Kul’bachniy S.E. Vnutrividovaya ekologicheskaya i temporal’naya differentsatsiya u tikhookeanskikh lososei. Ekologo-temporal’nye rasy i temporal’nye populyatsii kety *Oncorhynchus keta* = [Intraspecific ecological and temporal differentiation in Pacific salmons. Ecological-temporal races and temporal populations of chum salmon *Oncorhynchus keta*]. *Izvestiya TINRO*. 2010;163:91–105. (In Russ.).

4. Kul’bachniy S.E. Ekologiya i struktura populyatsii kety severo-zapadnoi chasti kontinental’nogo poberezh’ya Okhotskogo morya = [Ecology and structure of pink salmon population in north-western costal Sea of Okhotsk]: Candidate dissertation. Vladivostok; 2010. 148 s. (In Russ.).

5. Kanzeparova A.N. Osobennosti biologii i sovremennoe sostoyanie zapasov gorbushi (Oncorhynchus gorbuscha) severo-zapadnogo poberezh’ya Okhotskogo morya = [Peculiarities of biology and current state of the pink salmon stock (*Oncorhynchus gorbuscha*) of the North-West Coast of the Okhotsk Sea]: Candidate dissertation. Vladivostok; 2018. 148 s. (In Russ.).

6. Rogachev K.A., Carmack E.C., Foreman M.G.G. Bowhead whales feed on plankton concentrated by estuarine and tidal currents in Academy Bay, Sea of Okhotsk. *Cont. Shelf Res.* 2008;28:1811–1826. https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.04.014.

7. Melnikov V.V., Fedorets Yu.V. The distribution of zooplankton and bowhead whales, *Balaena mysticetus* Linnaeus, 1758, in Akademiya Bay, Sea of Okhotsk. *Russ. J. Mar. Biol.* 2016;42(3):216–221. DOI: 10.1134/S106307401603007X.

8. Shpak O.V., Paramonov A. Yu. Nablyudeniya za grenlandskimi kitami (*Balaena mysticetus*) v Shantarskom regione Okhotskogo morya; potentsial’nye ugrozy dlya vosstanovleniya chislennosti populyatsii = [Monitoring of bowhead whale (*Balaena mysticetus*) in the Shantar region of the Sea of Okhotsk: potential threats to population recovery]. *Marine Mammals of the Holarctic.* 2015;2:334–342. (In Russ.).

9. Shpak O.V., Paramonov A. Yu. The bowhead whale, Balaena mysticetus Linnaeus, 1758, in the western Sea of Okhotsk (2009–2016): distribution pattern, behavior, and threats. *Russ. J. Mar. Biol.* 2018;44(3):210–218. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063074018030082.

10. Volkov A.F. Integral’nye skhemy kolichestvennogo raspredeleniya massovykh vidov zooplanktona dal’nevostochnykh morei i severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana po srednemnogoletnim dannym (1984–2006 gg.)

= [Integral schemes of quantitative distribution of abundant species of zooplankton of the Far Eastern seas and the Northwest Pacific Ocean on average long-term data (1984–2006)]. *Izvestiya TINRO*. 2008;154:135–143. (In Russ.).

11. Steinberg D.K., Landry M.R. Zooplankton and the ocean carbon cycle. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 2017;9:413–444. DOI: 10.1146/annurev-marine-010814-015924.

12. Reilly S., Hedley S., Borberg J., Hewitt R., Thiele D., Watkins J., Naganobu M. Biomass and energy transfer to baleen whales in the South Atlantic sector of the Southern Ocean. *Deep-Sea Research.* Pt. II. 2004;51:1397–1409. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.06.008.

13. Tishchenko P. Ya., Lobanov V.B., Shul'kin V.M., Melnikov V.V., Tsoy I.B., Tishchenko P.P., Bannov V.A., Belous O.V., Vasileva L.E., Elovskaya O.A., Sagalaev S.G., Fedorets Yu.V. Comprehensive research of the coastal water area of the Sea of Japan and Sea of Okhotsk under the influence of river runoff (cruise 71 of the R/V Professor Gagarinskii). *Oceanology*. 2018;58(2):325–327. DOI: 10.7868/S0030157418020193.

14. Tishchenko P. Ya., Lobanov V.B., Tishchenko P.P., Semkin P. Yu., Sergeev A.F., Anisimova A.A., Barabanshchikov Yu.A., Melnikov V.V., Ryumina A.A., Sagalaev S.G., Ulanova O.A., Shvetsova M.G., Shkirnikova E.M. Hydrochemical study of Academy Bay (Sea of Okhotsk). *Oceanology*. 2022;62(1):80–92. DOI: 10.31857/S0030157422010166.

15. Semkin P. Yu., Tishchenko P. Ya., Pavlova G. Yu., Sagalaev S.G., Tishchenko P.P., Khodorenko N.D., Shkirnikova E.M., Shvetsova M.G. Effect of river runoff on the hydrochemical characteristics of water in Udskaya Bay and Nikolaya Bay (the Sea of Okhotsk) in summer. *Oceanology.* 2021;61(3):338–350. DOI: 10.31857/S0321059622050145.

16. Ivashchenko Yu., Clapham Ph. Bowhead whales *Balaena mysticetus* in the Okhotsk Sea. *Mammal Rev*. 2010;40(1):65–89. DOI: 10.1111/j.1365–2907.2009.00152.x.

17. Zolotukhin S.F. Predvaritel'naya otsenka nerestovogo fonda kety i gorbushi Tuguro-Chumikanskogo raiona (Okhotskoe more) = [Preliminary assessment of the spawning stock of chum and pink salmon in the Tuguro-Chumikanskiy district (Okhotsk Sea)]. *Chteniya pamyati Vladimira Yakovlevicha Levanidova.* 2005;3:622–628. (In Russ.).

18. Shpak O.V., Meschersky I.G., Glazov D.M., Litovka D.I., Kuznetsova D.M., Rozhnov V.V. Structure and assessment of beluga whale, *Delphinapterus leucas*, populations in the Russian Far East. *Mar. Fish. Rev.* 2020;81(3–4):72–86. DOI: https://doi.org/10.7755/MFR.81.3-4.3.

19. Jonsson B., Jonsson N. Migratory Atlantic salmon as vectors for the transfer of energy and nutrients between freshwater and marine environments. *Freshwater Biology*. 2003;48:21–27. DOI: https://doi.org/10.1046/j.1365–2427.2003.00964.x.

20. Tishchenko P.P., Tishchenko P. Ya., Semkin P. Yu., Shvetsova M.G. Phytoplankton primary production in the coastal water surrounding Shantar Archipelago. *Russ. J. Mar. Biol.* 2023;49(1):47–55.

21. Shpak O.V., Paramonov A. Yu. Nablyudeniya za belukhami (Delphinapterus leucas), kosatkami (Orcinus orca), gladkimi kitami (Balaenidae) v Ul'banskom zalive Okhotskogo morya = [Observations on the white whales (*Delphinapterus leucas*), killer whales (*Orcinus orca*), right whales (Balaenidae) in the Ulban Bay of the Sea of Okhotsk]. *Marine Mammals of the Holarctic*. 2012;2:395–400. (In Russ.).

22. Shuntov V.P., Temnykh O.S. Tikhookeanskie lososi v morskikh i okeanicheskikh ekosistemakh = [Pacific salmon in marine and ocean ecosystems]. Vol. 1. Vladivostok: TINRO-Center; 2008. 481 s. (In Russ.).

23. Volobuev V.V., Marchenko S.L. Tikhookeanskie lososi kontinental'nogo poberezh'ya Okhotskogo morya (biologiya, populyatsionnaya struktura, dinamika chislennosti, promysel) = [Pacific salmon of the continental coast of the Okhotsk Sea (biology, population structure, abundance dynamics, fishery)]. Magadan: North-East Sci. Center FEB RAS; 2011. 303 s. (In Russ.).

24. Lowry L., Frost K.J. Foods and feeding of bowhead whales in western and northern Alaska. *Sci. Rep. Whales Res. Inst.* 1984;(35):1–16.

25. Lowry L.F., Sheffield G., George J.C. Bowhead whale feeding in the Alaskan Beaufort Sea, based on stomach contents analysis. *J. Cetacean Res. Manage.* 2004;6(3):215–223.

26. Tretyakova M.O., Vardavas A.I., Vardavas C.I., Iatrou E.I., Stivaktakis P.D., Burykina T.I., Mezhuev Ya.O., Tsatsakis A.M., Golokhvast K.S. Effects of coal microparticles on marine organisms: A review. *Toxicology Reports*. 2021;8:1207–1219. DOI: 10.1016/j.toxrep.2021.06.006.

Научная статья
УДК 528.94:574.34
DOI: 10.31857/S0869769824020109
EDN: lczmjg

Оценка плотности и биомассы арктических гольцов *Salvelinus alpines* (L.) complex (Salmoniformes, Salmonidae) из двух олиготрофных озер Красноярского края

Ф.С. Лобырев

Федор Сергеевич Лобырев
кандидат биологических наук, научный сотрудник
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
lobyrev@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-4258-8765

Аннотация. Представлен метод оценки плотности рыб по уловам жаберных сетей разного шага ячеи. Метод основан на анализе количества рыбы разных размерных групп, подходящих к сети, путем моделирования движения рыбы, приводящего к взаимодействию с орудием лова. Метод учитывает технические характеристики сети, морфометрические параметры рыбы и ее поведенческие особенности. Процесс взаимодействия рыбы с орудием лова разбит на ряд последовательных этапов, для каждого из которых рассчитывается своя вероятность. Необходимые для расчета параметры получаются в результате первичного анализа уловов и частично берутся из литературных источников. Для оценки обилия показана ее чувствительность к ряду ключевых параметров модели. Оценка плотности получена для арктических гольцов *Salvelinus alpinus* (L.) из различных точек озер Лама и Капчук Красноярского края.

Ключевые слова: арктический голец, плотность, биомасса, жаберная сеть

Для цитирования: Лобырев Ф.С. Оценка плотности и биомассы арктических гольцов *Salvelinus alpines* (L.) complex (Salmoniformes, Salmonidae) из двух олиготрофных озер Красноярского края // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 2. С. 107–122.
http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020109, EDN: lczmjg

Благодарности. Автор выражает признательность А.Г. Осинову за организацию экспедиции.

Финансирование. Данный проект финансировался Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 17-04-00063).

Original article

Evaluation of density and biomass of arctic charr *Salvelinus alpinus* (L.) complex (Salmoniformes, Salmonidae) from two oligotrophic lakes in Krasnoyarsk Territory

F.S. Lobyrev

Fedor S. Lobyrev
Candidate of Sciences in Biology, Researcher
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
lobyrev@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-4258-8765

***Abstract*.** The paper considers the method of fish density estimation by gill net catches of different mesh size. The method is based on the analysis of the number of fish of different size groups approaching the net by simulating the movement of fish resulting in interaction with the net. The method include technical parameters of the net, morphometric features of fish and their behavioral characteristics. The process of interaction between fish and gill net is splitted into a series of sequential stages, each of which has its own probability calculated. The parameters necessary for the calculation are obtained from the primary analysis of catches and partly from literature data. For abundance estimation, its sensitivity to a number of key model parameters is shown. Density estimates were obtained for Arctic charr *Salvelinus alpinus* (L.) from various locations in Lama and Kapchuk lakes, Krasnoyarsk Territory.

Keywords: arctic charr, density, biomass, gill nets

For citation: Lobyrev F.S. Evaluation of density and biomass of arctic charr *Salvelinus alpinus* (L.) complex (Salmoniformes, Salmonidae) from two oligotrophic lakes in Krasnoyarsk Territory. *Vestnik of the FEB RAS.* 2024;(2):107–122. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020109, EDN: lczmjg

Acknowledgments. Author is grateful to the A.G. Osinov for organizing the expedition.

Funding. This project was founded by the Russian Foundation for Basic Research (Project N17-04-00063).

Введение

Рыбохозяйственное освоение малых озер и водоемов, на долю которых в Российской Федерации приходится порядка 2591 км^3 воды [1], становится все более актуальной проблемой в связи с уменьшением запасов ценных промысловых видов рыб в озерах высокого рыбохозяйственного статуса и в целом на фоне кризиса в водных экосистемах мирового значения [2]. На малые водоемы обращено повышенное внимание благодаря возможности обеспечивать население рыбной продукцией за счет аквакультуры и пастбищного рыболовства [3], а также в свете решения общебиологических задач, таких как оценка продуктивности ихтиоценозов [4], изучения инвазий [5], изучения особенностей формирования рыбного населения [6] и комплексная экологическая оценка водных биот [7]. Подобные исследования невозможны без оценок количественных показателей рыбных сообществ на основе уловов промысловых орудий, однако промысел на малых водоемах имеет свои особенности, одна из которых заключается в сложности применения отцеживающих орудий лова для получения репрезентативных выборок [8]. В связи с этим разработка и внедрение методов оценки плотности рыбного населения по уловам пассивных орудий лова, прежде всего жаберных сетей, становится актуальной задачей, способствующей достижению поставленных целей.

Достоинства жаберной сети очевидны. Это бесшумное орудие лова, простое в обращении, компактное в транспортировке, сравнительно дешевое по себестоимости и эксплуатации; набором сетей разного шага ячеи несложно одновременно обловить несколько участков водоема и/или различные горизонты. Тем не менее, несмотря на популярность жаберной сети, методическая база для расчета количественных показателей ихтиофауны с использованием сетных уловов скудна [8–11], а практическое применение часто ограничено сложностью оценивания параметров моделей, таких, например, как «пороги узнавания сети зрением и боковой линией» или «дальность уверенного обмена информацией между особями» при реакции на сеть [12]. В связи с этим подавляющее большинство как российских, так и зарубежных исследований в этой области посвящено оценкам селективности и уловистости жаберных сетей.

Под селективностью обычно понимают показатель, характеризующий относительную вероятность удержания рыбы данного размера в сети данного шага ячеи [13–15]. Существуют два принципиально различных подхода к оценке селективности сетей, а именно методы *прямой* оценки [16–19] и методы *косвенной* оценки [15, 20–25]. В первом случае селективность находится путем сравнения численности одних и тех же размерных групп в уловах жаберных сетей и в уловах отцеживающего орудия, для которого уловистость полагается известной; в более современных подходах используются данные гидроакустики [26, 27]. Во втором случае сопоставляются частоты одних и тех же размерных групп в уловах, полученных одновременной постановкой сетей разной ячеи, изначально допуская, что кривые селективности описываются одной из нескольких возможных функций: нормальной, логнормальной, гамма-функцией, инвертированной гауссовской или бинормальной [15]; данный подход по сути является статистическим, а выбор уравнения зависит от того, какая из функций даст наилучшую аппроксимацию. Слабая сторона метода в том, что на практике возникают ситуации, когда картину распределения частот в выборках невозможно описать исходя из теории – в этом случае уловы, не имеющие куполообразного распределения, считаются непригодными для анализа как не соответствующие законам перевода частот размерных классов в улове в частоты этих же размерных групп в популяции [28].

Уловистость определяет результативность лова, выраженную в эффективности орудия лова по отношению к облавливаемой совокупности и численно равную доле рыб, удержанных орудием лова, от общего их количества в зоне облова [11, 12, 29–32]. На уловистость оказывает влияние поведенческая составляющая реакции рыбы на сеть, а также на рыбу, уже удержанную в сети; сама же уловистость жаберной сети связывается преимущественно со снижением ее улавливающей способности по мере увеличения количества удержанной рыбы. В частности, Ф.И. Баранов [33] предлагал расчет уловистости сетей K на основании знания двух последовательных уловов как

$$K = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

получившей название абсолютной уловистости II рода в отличие от уловистости I рода, обусловленной факторами чисто механического воздействия [29].

Основная методическая сложность в оценке показателей обилия по сетным уловам заключается в том, что, в отличие от отцеживающих орудий лова, для которых объем облова легко рассчитывался через параметры орудия лова, скорость его движения и форму зоны облова, жаберная сеть – стационарное орудие; соответственно, объем облова, а следовательно, и количество в нем рыбы, должны рассчитываться исходя прежде всего из движения самой рыбы. Таким образом, в основе оценки уловистости жаберных сетей и рассчитываемой на ее базе оценки обилия лежат ответы на два вопроса: 1) каков объем воды, из которого было выловлено данное количество рыбы, 2) сколько рыбы изначально было в этом объеме.

Текущая работа посвящена применению на практике метода оценки плотности рыб по уловам, полученным одновременной постановкой жаберных сетей разного шага ячеи [34, 35]. Расчет количественных показателей сделан для группировок арктического гольца *Salvelinus alpinus* из двух точек оз. Лама и двух точек оз. Капчук, Красноярский край. Метод записан в коде языка *R* и размещен на сайте https://github.com/ItaiVR/Lobyerev-selectivity.

Материал и методы исследования

Кратко изложим подход к оценке плотности по уловам жаберных сетей. Пусть рыба некоторой длины касается сети данного размера ячеи. Взаимодействие рыбы с сетью, приводящее к ее удержанию, является многоступенчатым процессом, где каждый этап характеризуется своей вероятностью (рис. 1).

Для анализа необходимо разделить всю пойманную рыбу на объячеившуюся N_W и запутавшуюся N_T, не смешивая уловы сетей разной ячеи. Количество всех подошедших к сети за время лова рыб складывается из числа уловленных сетью рыб, прошедших сквозь ячею и отошедших от сети вследствие ее насыщаемости. Тогда формула для оценки количества рыб $N^{(t)}_{AP\_l,\mu}$ размерной группы *l*, подошедших к сети ячеи μ за время *t*, имеет следующий вид:

$$N^{(t)}_{AP\_l,\mu} = \frac{N_{\lim\_l,\mu} \cdot 0{,}63 \cdot e}{\tilde{\tau}_\mu} \cdot t + \left(\begin{array}{c} \dfrac{N^{(t)}_{W\_l,\mu}}{P(O|C)_{l,\mu} \cdot P(E|O)_{l,\mu} \cdot P(W|E)_{l,\mu}} - \\ -(N^{(t)}_{W\_l,\mu} + N^{(t)}_{T\_l,\mu}) \end{array} \right), \qquad (1)$$

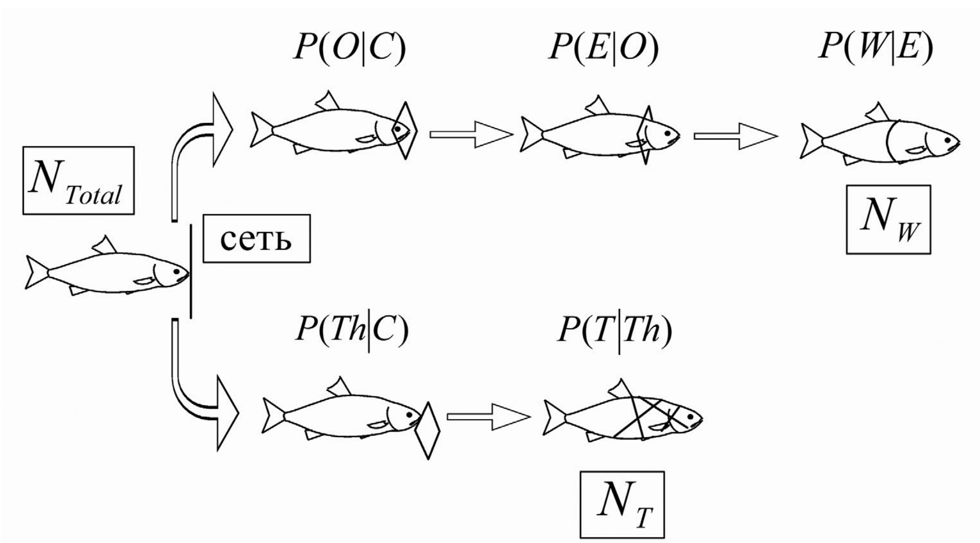


Рис. 1. Различные этапы взаимодействия рыбы с жаберной сетью. N_{Total} – общее количество рыбы, прикоснувшейся к сети, N_W – количество объячеившейся рыбы, N_T – количество запутавшейся рыбы. Вероятность: $P(O|C)$ – попадания рыбы в ячею при касании, $P(Th|C)$ – попадания ртом на нить при касании, $P(E|O)$ – захода в ячею, $P(W|E)$ – удержания в сети через объячеивание, $P(T|Th)$ – удержания в сети через запутывание. Вертикальная черта обозначает условную вероятность

где индексы μ и l указывают на то, что для каждой размерной группы l и для каждого размера ячеи μ параметры уравнения (1) уникальны; в дальнейшем для краткости индексы будут опущены. Вероятность $P(O|C)$ рыбы зайти в ячею при касании сети задана следующей функцией:

$$P(O|C) = \frac{\left(\cos\frac{\gamma}{2}\mu - h\right)\left(\sin\frac{\gamma}{2}\mu - \tan\frac{\gamma}{2}h\right)}{\cos\frac{\gamma}{2}\cdot\sin\frac{\gamma}{2}\cdot\mu^2}, \quad (2)$$

где μ – расстояние между узлами ячеи, γ – меньший угол ромба ячеи, h – средняя ширина рта рыбы при движении; параметр h оценивается по следующей формуле:

$$h = j\cdot 2\sin\phi, \quad (3)$$

где j – средняя длина челюсти рыбы данной размерной группы, ϕ – угол между верхней и нижней челюстью рыбы при движении; угол ϕ находится минимизацией следующей функции:

$$f(\phi) = \frac{\sum\sigma_l^2}{\sum\bar{N}_{AP\_l,\mu}^{(t)}}, \quad (4)$$

где σ_l^2 – дисперсия средних длин одних и тех же размерных групп в сетях разного размера ячеи, $\bar{N}_{AP\_l,\mu}^{(t)}$ оценивается по формуле (13); суммирование проходит по всем размерным группам, имеющимся одновременно в сетях разной ячеи. Вероятность $P(E|O)$ рыбы зайти в ячею описывается как

$$P(E|O) = 1 - \frac{2}{\pi}\cdot\arcsin\left(\frac{d}{\omega}\right), \quad (5)$$

где d – половина толщины тела рыбы в области касания ячеи жаберной крышкой, ω – меньшая диагональ ромба ячеи. Распределение вероятностей $P(E|O)$ с хорошей точностью находится аппроксимацией опытных значений линейной функцией вида $a - b - l$, где a и b – опытным путем полученные коэффициенты, l – длина рыбы. Наконец, функция для вероятности $P(W|E)$ рыбы войти в улов при объячеивании имеет следующий вид:

$$P(W|E) = \frac{N_{T\_1{,}14\cdot G_{\max}>4\mu}}{N_{T\_1{,}14\cdot G_{\max}>4\mu} + N_{T\_1{,}14\cdot G_{\max}\le 4\mu}}, \quad (6)$$

где $N_{T\_G_{\max}>4\mu}$ и $N_{T\_G_{\max}\le 4\mu}$ – количество рыбы данной размерной группы с максимальным охватом тела $G_{\max}$, большим и меньшим периметра ячеи соответственно.

Параметр $N_{\lim}$ функции (1) определяет максимальное количество рыбы данного вида, которое данная сеть может уловить; он находится индивидуально путем выставления сети на время, пока она целиком не заполнится рыбой. Параметр $\tilde{\tau}$ есть время, за которое не занятая рыбой площадь сети уменьшается в $e \approx 2{,}72$ раз при условии, что за каждый отрезок времени к сети в среднем подходит одно и то же количество рыбы. Параметр $\tilde{\tau}$ выражается следующей функцией:

$$Q_t = N_{\lim}\cdot\left(1 - \exp\left(-\frac{1}{\tilde{\tau}}t\right)\right), \quad (7)$$

где Q_t – улов сети данной длины и размера ячеи, полученный за время t. Наконец, 0,63 = 1 − exp (−1). Завершающим этапом является оценка плотности N_{D_l} размерной группы l в зоне облова:

$$N_{D\_l} = \frac{N_{AP\_l,\mu}^{(t)}}{P(A_F)_l\cdot V_F}, \quad (8)$$

где $P\left(A_F\right)_l$ – усредненная по всей зоне облова вероятность подхода к сети рыбы длины l:

$$P\left(A_F\right)_l = \frac{\tilde{P}\left(x_0, y_0\right) \cdot \frac{L}{2}\rho}{\frac{L}{2}\rho + \frac{\pi\rho^2}{4}} + \frac{\tilde{P}\left(x_0, y_0\right) \cdot \frac{\pi\rho^2}{4}}{\frac{L}{2}\rho + \frac{\pi\rho^2}{4}}, \tag{9}$$

где L – длина сети, м, ρ – максимальное расстояние, м, на которое сместится рыба длины l за время застоя сети при условии ненаправленного перемещения, оцениваемое как

$$\rho = v \cdot \left(t \cdot \tau\right)^{0,5}, \tag{10}$$

где v – скорость движения рыбы, t – время лова, τ – период изменения направления прямолинейного движения. Параметр V_F функции (8) есть объем зоны облова:

$$V_F = \left(L \cdot \rho + \pi \cdot \rho^2\right) \cdot H, \tag{11}$$

где H – высота сети, L – длина сети. Наконец, в формуле (9) вероятность $\tilde{P}\left(x_0, y_0\right)$ для рыбы подойти к сети, находясь в любой точке зоны облова, равна

$$\tilde{P}\left(x_0, y_0\right) = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\theta}{2\pi} \cdot \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{r}{\sqrt{t}}}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx\right)}{n}, \tag{12}$$

где θ – угол, под которым рыба «видит» сеть [13], r – кратчайшее расстояние от точки начального положения рыбы в зоне облова до сети, t – время облова, n – количество точек разбиения зоны облова (рис. 2).

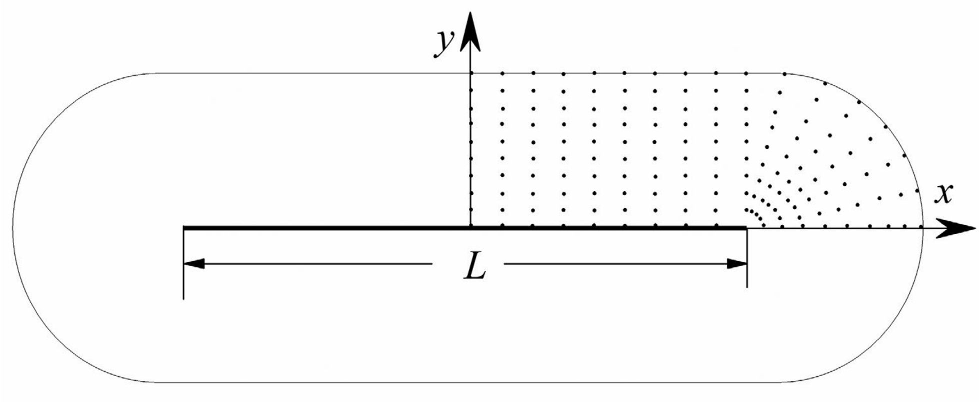


Рис. 2. Схема зоны облова жаберной сети; каждая точка в верхней четверти зоны является узлом, для которого рассчитывается вероятность по формуле (13), L – длина сети

В связи с тем, что расчеты вероятности $P\left(A_F\right)$ весьма трудоемкие, построена номограмма для ее оценки при различных значениях ρ и длины сети L (рис. 3). Распределение $P\left(A_F\right)$ хорошо описывается экспоненциальной функцией вида $A \cdot \exp\left(-\rho / B\right)$ (R = 0,99), где A и B – опытно оцененные параметры; $P\left(A_F\right)$ можно также вычислить, подставляя в эту функцию величину ρ и величины A и B для нужной длины сети.

После расчета значения $N^{(t)}_{AP\_l,\mu}$ необходимо найти среднее количество $\bar{N}^{(t)}_{AP\_l}$ рыбы размера l, подошедшей к любой из используемых сетей:

$$\bar{N}^{(t)}_{AP\_l} = \frac{\sum_{\mu=1}^{n} N^{(t)}_{AP\_l,\mu}}{n}, \tag{13}$$

где n – количество сетей разной ячеи; если все сети одного размера и высоты, для номограммы берется длина одной сети, в противном случае уловы нормализуются на единую площадь сети. Наконец, биомасса B_l размерной группы l рассчитывается по следующей формуле:

$$B_l = N_{D\_l} \cdot \bar{W}_l, \tag{14}$$

где N_{D_l} – плотность размерного класса l, $\bar{W}_l$ – средняя масса размерного класса l.

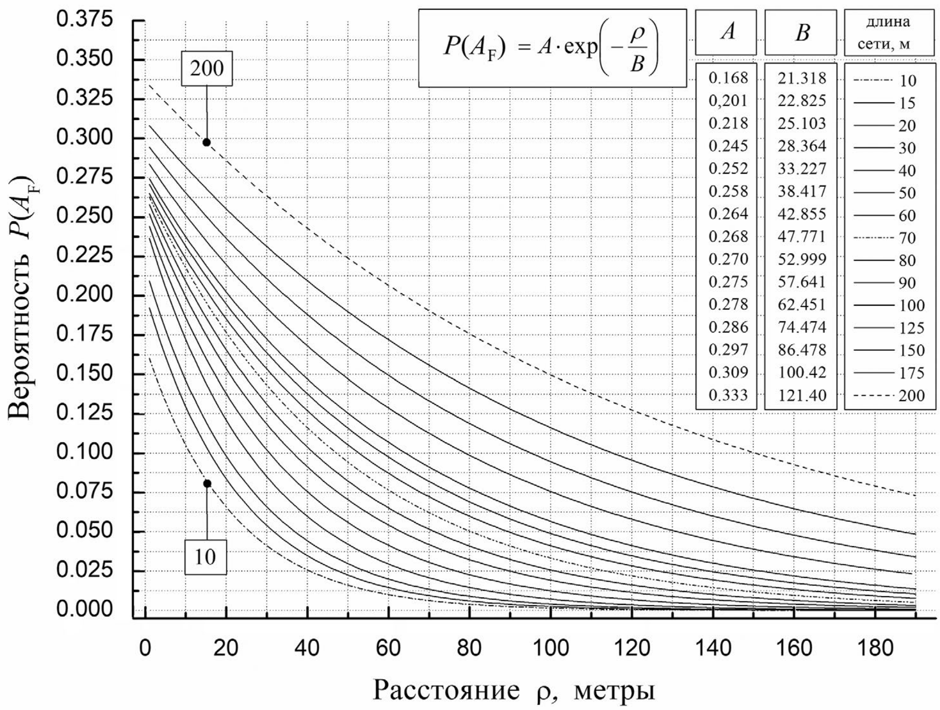


Рис. 3. Номограмма для оценки вероятности $P(A_F)$ подхода рыбы к сети при различных значениях ρ и L

Выборки гольца получены сетным ловом в период с 5 августа по 3 сентября 2019 г. вблизи устьев двух нерестовых рек – р. Никита-Юрэх, впадающей в оз. Капчук (69º48′ с.ш., 90º98′ в.д.), и р. Бунисяк, впадающей в оз. Лама (69º39′ с.ш., 91º59′ в.д.); средние глубины лова 15 и 12 м соответственно. Кроме того, было выбрано по одной контрольной станции для каждого озера – точка с координатами (69º48′ с.ш., 91º88′ в.д.) на оз. Капчук и точка (69º41′ с.ш., 91º52′ в.д.) на оз. Лама; глубины лова 18 и 28 м соответственно. Станции пронумерованы в порядке облова: оз. Капчук – станция 1, оз. Капчук, р. Никита-Юрэх – станция 2, оз. Лама – станция 3 и оз. Лама, р. Бунисяк – станция 4 (рис. 4). Обловы проведены одновременной постановкой на дно одностенных жаберных сетей шага ячеи 20, 30 и 40 мм; длина

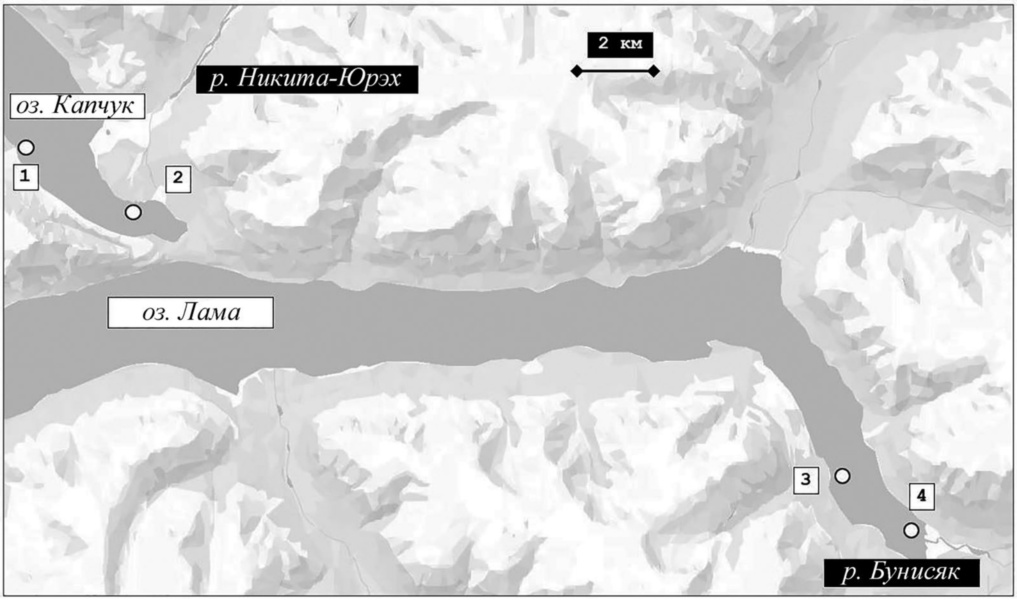


Рис. 4. Карта-схема района исследования; цифрами указаны места облова на озерах Лама и Капчук

и высота каждой сети 30 и 1,5 м соответственно, время лова 12 ч. Всего произведено обловов: станция 1–3 облова, станция 2–3, станция 3–2, станция 4–7 обловов. В процессе первичной обработки уловов все рыбы были измерены, взвешены и сфотографированы; у каждой рыбы измерены максимальный охват и длина челюсти как параметры, необходимые для оценки соответствующих вероятностей.

Результаты исследования

Суммарная выборка гольца по четырем станциям составила 239 экз.; в табл. 1 дано распределение размерных групп запутавшихся и объячеившихся рыб по сетям разной ячеи. Совместно с гольцом в суммарных уловах было: 143 сига (*Coregonus lavaretus*), 4 валька (*Prosopium cylindraceum*), 9 сибирских ряпушек (*Coregonus sardinella*) и 12 налимов (*Lota lota*). Эти рыбы не представлены в табл. 1, однако они учитывались при оценке параметра $N_{\lim}$ для каждой сети. Также оценена доля гольцов разных форм в уловах [36], их средняя длина по выборке и разброс длины (табл. 2).

Для оценки $N^{(t)}_{AP\_l,\mu}$ по функции (1) были рассчитаны соответствующие вероятности. Так, для каждого размера ячеи оценена вероятность $P(O|C)$ при длине челюсти гольца, заданной линейной функцией вида $0,78 \cdot l - 1,04$, где (здесь и далее) l – длина рыбы. Тогда распределение вероятностей $P(O|C)$ для диапазона размерных групп из улова для сетей ячеи 20, 30 и 40 мм формально аппроксимировалось функциями $0,98 - 0,01 \cdot l$, $0,99 - 0,01 \cdot l$ и $1,00 - 0,01 \cdot l$ соответственно. Формальная аппроксимация (здесь и далее) *реальных* значений вероятностей наиболее подходящей для этого функцией делается для удобства работы со всем массивом данных. Распределение вероятностей $P(E|O)$ описывается линейными функциями $1,87 - 0,06 \cdot l$, $2,60 - 0,07 \cdot l$ и $2,69 - 0,06 \cdot l$, распределение вероятностей $P(W|G)$ аппроксимируется возрастающими линейными функциями вида $0,06 \cdot l - 1,01$, $0,07 \cdot l - 1,60$ и $0,06 \cdot l - 1,53$ для сетей ячеи 20, 30 и 40 мм соответственно. Предельные количества гольца $N_{\lim}$ для указанных сетей (в составе других видов) – 28, 24 и 21экз. соответ-

Таблица 1

Размерный состав гольца в уловах по каждой станции и в сетях разной ячеи

Длина, см	Номер станции				Размер ячеи, мм					
					20		30		40	
	1	2	3	4	О	З	О	З	О	З
14	–	–	–	1	–	1	–	–	–	–
15	–	–	1	1	–	2	–	–	–	–
16	–	1	–	1	–	2	–	–	–	–
17	2	–	–	7	4	3	–	1	–	1
18	–	3	1	6	5	3	–	2	–	–
19	2	4	–	12	9	7	–	2	–	–
20	2	1	–	11	8	5	–	1	–	–
21	1	3	2	15	12	6	–	2	–	1
22	2	–	1	7	5	1	–	3	–	1
23	2	2	–	7	6	3	–	1	–	1
24	6	3	2	2	5	4	–	3	–	1
25	4	2	–	1	3	2	1	1	–	–
26	4	2	1	4	2	2	2	3	–	2
27	1	–	–	1	–	–	1	–	1	–
28	1	9	–	2	1	–	6	2	2	1
29	–	3	–	2	1	1	1	–	1	1
30	3	2	4	1	1	–	3	2	3	1
31	1	4	6	1	1	1	4	2	2	2
32	1	4	2	3	–	1	4	2	3	–
33	–	2	3	6	–	1	3	1	4	2
34	–	5	1	4	–	1	2	3	3	1
35	1	4	–	4	–	–	2	2	3	2
36	–	1	–	–	–	–	–	–	1	–
37	–	1	–	3	–	–	1	–	1	2
38	–	5	–	–	–	–	1	2	1	–
39	–	2	–	1	–	–	–	1	1	1
40	–	1	–	–	–	–	–	–	1	–
41	–	–	–	2	–	–	–	–	1	1
42	1	1	1	–	–	–	–	1	–	2
43	–	2	–	–	–	–	–	–	–	2
44	1	–	–	–	–	–	–	–	–	1
45	1	1	–	–	–	–	–	–	–	2
46	–	1	–	–	–	–	–	–	–	1
47	–	1	–	–	–	–	–	–	–	1
48	–	2	–	–	–	–	–	–	–	2
49	–	м	–	–	–	–	–	–	–	1
50	–	1	–	–	–	–	–	–	–	1
Итого	239 экз.				239 экз.					

Примечание. О – объячеявшиеся рыбы, З – запутавшиеся.

ственно. Параметр $\tilde{\tau}$, выраженный из функции (7), для сетей ячеи 20, 30 и 40 мм составляет 52, 74 и 70 ч соответственно; угол ϕ равен 5 град. Для оценки смещения ρ используется средняя скорость движения 0,9 длины тела в секунду [37–40] и параметр τ, равный 1 с, откуда значение ρ для наблюденных в улове размерных групп составляет в среднем 92 м (SD = 24 м). Отсюда объем облова, рассчитанный по формуле (11), равен в среднем 54 832 м^3(SD = 23 993 м^3).

Таблица 2

Средняя, максимальная и минимальная длина гольцов различных форм в уловах по четырем точкам и их доли в уловах

Объект исследования	Номер станции			
	1	2	3	4
Боганидская палия	$\frac{18,5-45,6}{31,3(0,04)}$	$\frac{18,0-50,4}{29,2(0,08)}$	$\frac{30,6-37,2}{33,9(0,04)}$	$\frac{16,2-41,9}{25,9(0,25)}$
Голец Дрягина	–	$\frac{16,9-49,3}{28,6(0,01)}$	$\frac{24,7-44,2}{35,4(0,36)}$	$\frac{14,0-39,6}{25,2(0,38)}$
Голец-«пучеглазка»	$\frac{21,1-39,3}{27,6(0,12)}$	$\frac{20,5-48,5}{31,5(0,20)}$	$\frac{26,1-50,7}{35,7(0,46)}$	$\frac{17,7-41,6}{27,3(0,22)}$
Горный голец	$\frac{18,0-43,9}{30,8(0,08)}$	$\frac{19,2-44,8}{32,7(0,19)}$	–	$\frac{18,6-43,8}{35,7(0,11)}$
«Основная» форма	$\frac{19,8-49,5}{32,4(0,72)}$	$\frac{26,3-39,9}{36,5(0,49)}$	$\frac{2473-38,6}{37,1(0,04)}$	–

Примечание. Над чертой – min–max (в см), под чертой – средняя длина (в см); в скобках приводится доля гольцов данной формы от общей численности в улове в данной точке.

В результате оценки плотности для четырех точек для объема облова 54 832 м^3 составляют: точка 1–0,014 экз./м^3, точка 2–0,024 экз./м^3, точка 3–0,011 экз./м^3, точка 4–0,027 экз./м^3; биомасса гольца в диапазоне размерных групп 17–39 см составляет: точка 1–1,69 г/м^3, точка 2–4,72 г/м^3, точка 3–3,55 г/м^3, точка 4–5,04 г/м^3. Плотность и биомасса всех форм гольцов по всем точкам пропорциональна доле каждой формы в улове (см. табл. 2).

Обсуждение результатов

Оценки плотности и биомассы арктических гольцов получены на основе уловов сетей трех размеров ячеи, 20, 30 и 40 мм, взятых с диапазона глубин 12–28 м. Представленные оценки обилия являются интегральными, тем не менее не составит труда вычислить плотность и биомассу для каждой формы гольца в каждой точке, используя доли от общей численности каждой формы в улове (табл. 2); соответственно, плотность и биомасса каждой формы равняется интегральной оценке обилия, умноженной на долю этой группы в улове. Величины плотности и биомассы рассчитаны только для размерных групп, наблюденных в улове, а собранные данные не позволяют построить, например, кривую населения Баранова в силу недостаточного объема выборок и того, что не для всех особей удалось определить возраст. Оценки обилия получены для биотопов с предположительно различными характеристиками, такими как близость речного стока, ветровой режим, кормность, температура и т.д., однако из-за нехватки эмпирических данных сопоставление величин плотности и биомассы на фоне параметров среды между разными точками не приводится.

Методика подробно освещена в двух публикациях [34, 35], в текущей же работе даны рекомендации, касающиеся в основном технических деталей. Для получения достоверных оценок обилия необходимо использовать как минимум три сети разного шага ячеи с такими размерами ячеи, чтобы уловы перекрывались, при этом чем сильнее перекрывание, т.е. чем больше число размерных групп, общих для уловов разной ячеи, тем точнее оценка плотности. Увеличение количества разноячейных сетей также преследует своей целью охват максимально возможного диапазона размерных групп в популяции, так как жаберная сеть одной ячеи эффективно удерживает рыбу лишь в достаточно узком диапазоне размерных классов.

Основной источник погрешности при разборе уловов связан с оценкой принадлежности рыбы к классу объячеившихся и запутавшихся рыб; смещение долей этих групп приведет к искажению оценки обилия вследствие погрешности в оценках вероятности $P(O|C)$ захода в ячею рыб и альтернативной ей вероятности $P(Th|C)$ попадания ртом на нить. Объячеивание и запутывание являются лишь визуальными признаками, указывающими на характер взаимодействия рыбы с сетью; как правило, эти группы легко различимы при выпутывании рыбы из сети. Тем не менее в ряде случаев рыба, зайдя в ячею, может запутаться в сети при попытке из нее вырваться, чем маскируется ее принадлежность к классу объячеившихся рыб. Спорные случаи решаются последовательным снятием ячеи с тела рыбы.

Расчет плотности включает в себя вычисление вероятностей для каждого этапа взаимодействия рыбы с сетью, а также соответствующего ему количества рыб, что представляет собой достаточно объемную вычислительную процедуру (функция (1)). Однако расчет существенно облегчается построением вычислительных блоков в программе Excel, где каждый блок описывает отдельный этап взаимодействия. В функцию любой из вероятностей одним из аргументов входит размерный класс рыбы плюс параметры модели, специфичные для данного этапа; исходя из этого порядок вычисления устанавливается согласно последовательности взаимодействий рыбы сетью (рис. 1), а распределение вероятности для каждого этапа задается как функция наблюденных в улове размерных групп. Наибольшую сложность вызывает вычисление вероятности $P(A_F)_l$ подхода рыбы размера l к сети по формуле (9), однако ее оценка существенно упрощается благодаря использованию номограммы (рис. 3), построенной с помощью скрипта в программе MATLAB 7.5.0. Для оценки вероятности $P(A_F)_l$ необходимо рассчитать смещение рыбы ρ размерной группы l за время лова по формуле (10), затем отложить полученную величину на оси абсцисс, поднять перпендикуляр до кривой вероятности, соответствующей сети используемой длины, и из точки пересечения опустить перпендикуляр на ось ординат. Более точный результат даст применение функции $P(A_F)_l = A \cdot \exp(-\rho / B)$, где аргументом является смещение ρ, а коэффициенты A и B берутся из рис. 3. Нужно подчеркнуть, что подобная оценка $P(A_F)_l$ используется только в случае ненаправленного перемещения рыбы; если движение прямолинейное (миграция), расчет вероятности $P(A_F)_l$ будет иным [35].

Ключевыми параметрами модели, оценка которых почти всегда сопряжена с неопределенностью, являются скорость движения рыбы v (длина тела в секунду), период τ изменения направления прямолинейного движения (секунды), угол ϕ между верхней и нижней челюстью рыбы при движении (градусы) и максимальное количество рыбы данного вида N_{lim}, которое данная сеть может уловить (экземпляры). Скорость движения берется из литературных источников по причине сложности ее оценки, однако истинное ее значение «зажато» в относительно узком интервале порядка 0,5–2,0 длины тела в секунду. Необходимо принять во внимание и следующее обстоятельство. Как известно, для всех видов рыб абсолютная скорость движения прямо пропорциональна размерам тела [39], однако для облигатно или факультативно стайных видов скорость движения всех особей в группе одна, что способствует сохранению функций стаи, тогда как размеры отдельных рыб в группе колеблются в некоторых пределах [41]. Таким образом, в отношении определенного диапазона размерных групп скорость движения должна быть усреднена. Параметр τ задает среднее время, которое тратит рыба на поворот в процессе хаотического перемещения; данный параметр может быть оценен из несложных экспериментов

[35] или взят из литературы. Оценка параметра $N_{\lim}$ производится на основании предварительных обловов, когда сеть выставляется на время, превышающее время лова при сборе материла (в среднем до полутора суток в зависимости от условий), до полного ее насыщения; при этом также можно учесть и фактор заиливания (при его наличии), снижающий со временем улавливающие свойства сети. Наконец, параметр ϕ является результирующей величиной, связанной с величинами остальных параметров, и его точность напрямую зависит от точности исходных параметров. В методической статье [35] предложена схема оценки «чувствительности» расчетной величины плотности к величине ошибки каждого из параметров. Например, при отклонении любого из параметров на ±40% относительно своего истинного значения в популяции смещение оценки плотности относительно своего реального значения в среднем составляет для τ – 12%, для $N_{\lim}$ – 21%, для v – 40% и для ϕ – 66%. Таким образом, в данном диапазоне погрешности оценка плотности наименее чувствительна к параметру τ и наиболее – к ϕ; кроме того, чувствительность будет зависеть от знака ошибки.

В основу метода положены следующие допущения: а) в течение периода лова характер движения и скорость движения для данного вида не меняются, б) характер движения рыбы известен (хаотическое или направленное перемещение), в) сеть для рыбы невидима. Допущения (а) и (б) принимаются во внимание, исходя из знания экологии изучаемых видов в данное время суток и в данный сезон в конкретном водоеме. Учитывая характер движения – хаотическое перемещение при кормовом поведении или прямолинейное при миграциях – можно соответствующим образом настроить модель для получения достоверных оценок обилия. Допущение (в) в идеале выполняется, с одной стороны, при использовании сетей соответствующей окраски [42, 43], а с другой – при выборе времени лова: как правило, видимость сетей в сумеречное время существенно снижается. Таким образом, получение репрезентативных оценок достигается при учете всей совокупности факторов среды и особенностей поведения объекта. К примеру, на оз. Лама и оз. Капчук сбор данных проводился во время «белых» ночей, т.е. освещенность в период суточных обловов в целом не менялась; отсюда в первом приближении активность гольца можно считать постоянной.

В заключение хотелось бы отметить, что оценка плотности по описанной выше схеме проводится для видов рыб с достаточно большим конечным ртом и озубленными челюстями, для которых попадание ртом на нить с высокой вероятностью приведет к запутыванию. Если же объектом анализа оказываются виды с относительно небольшим неозубленным ртом, нижним, полунижним или верхним, как, например, у карповых и сиговых, вероятность попадания ртом на нить близка к нулю, т.е. $P(Th|C) \sim 0$, $P(T|Th) \sim 0$, и следовательно, $P(O|C) \sim 1$. В этом случае расчет плотности производится по особому алгоритму, где в основу положено сравнение максимальных охватов рыб из уловов сетей разного размера ячеи [44].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Измайлова А.В., Корнеенкова Н.Ю. Озерность территории Российской Федерации и определяющие ее факторы // Вод. ресурсы. 2020. Т. 47, № 1. С. 16–25. DOI: 10.31857/S0321059620010083.

2. Timoshkin O.A., Samsonov D.P., Yamamura M. et al. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? // J. Great Lakes Res. 2016. Vol. 42. P. 487–497. DOI: 10.1016/j.jglr.2016.02.011.

3. Волкова Н.И., Крючкова Г.Н., Михалева Т.В. и др. Биологическая продуктивность озера Ханбалык и его рыбохозяйственное использование // Вестн. рыбохоз. науки. 2017. Т. 4, № 3. С. 27–36.

4. Лукерин А.Ю., Романенко Г.А., Осипов С.А. Продуктивность Касмалинской озерной системы Алтайского края // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: материалы II Международ. конф. Казань, 2019. Ч. 2. С. 292–296.

5. Ушакова А.А., Постнов И.Е. Распространение и численность двух видов рыб (ротана и девятииглой колюшки), являющихся инвазионными для малых рек Нижегородской области // Вестн. Нижегород. гос. с.-х. акад. 2019. № 1 (21). С. 21–26.

6. Рафиков Р.Р., Захаров А.Б., Новоселов А.П. Формирование рыбного населения малых водохранилищ Республики Коми // Вестн. Сев. (Аркт.) федерал.ун-та. Серия: Естеств. науки. 2015. № 3. С. 59–67. DOI: 10.17238/issn2227–6572.2015.3.59.

7. Селезнев В.А., Селезнева А.В., Рахуба А.В. и др. Комплексная оценка экологического состояния малых рек (на примере реки Подстепновки) // Вод. х-во России: пробл., технол., управление. 2018. № 6. С. 83–100.

8. Шибаев С.В., Соколов А.В. Метод анализа ихтиоценозов малых водоемов Калининградской области на основе контрольных обловов сетными орудиями лова // Тр. ВНИРО. Вод. биол. ресурсы. 2014. Т. 151. С. 158–164.

9. *Ионас* В. А. Об уловистости дрифтерной сети // Рыб. х-во. 1966. № 7. С. 43–45.

10. *Кушнаренко А.И., Лугарев* Е.С. Оценка численности рыб по уловам пассивными орудиями // Информационное и математическое обеспечение исследований сырьевой базы: сб. науч. тр. ВНИРО. М., 1985. С. 113–121.

11. *Грачев А.А., Мельников* В.*Н*. Разработка и применение математических моделей для повышения эффективности лова рыбы / ЭКИНАС. М.: ВНИЭРХ, 2003. Вып. 1. 48 с.

12. *Блинов В.В.* О математических моделях приближения рыбы к жаберной сети // Тр. по промышлен. рыболовству / ЦНИИТЭиРХ. 1973. Т. 1. С. 31–38.

13. *Баранов Ф.*И. Техника промышленного рыболовства. М.: Пищепромиздат, 1960. 696 с.

14. Hamley J.M., Regier H.A. Direct estimates of gillnet selectivity to walleye (*Stizostedion vitreum vitreum*) // J. Fish. Res. Board of Canada. 1973. Vol. 30. P. 817–830. DOI: 10.1139/f73-137.

15. Millar R., Fryer R. Estimating the size-selection curves of towed gears, traps, nets and hooks // Rev. Fish Biol. Fish. 1999. Vol. 9. P. 89–116. DOI: 10.1023/A:1008838220001.

16. Денисов Л.И. Методика прямого учета численности рыб на Каховском водохранилище // Изв. ГосНИОРХ. 1977. Т. 126. С. 114–125.

17. *Сечин* Ю.Т. Оценка численности рыб по уловам ставных сетей // Вопросы теории и практики промышленного рыболовства. Поведение гидробионтов в зоне действия орудий лова. М.: ВНИРО, 1998. С. 115–118.

18. Winters G.H., Wheeler J.P. Direct and indirect estimation of gillnet selection curves of Atlantic herring (*Clupea harengus harengus*) // Can. J. Fish. Aquatic Sci. 1990. Vol. 47. P. 460–470. DOI: 10.1139/f90–050.

19. Borgstrøm R. Direct estimation of gill-net selectivity for roach (*Rutilus rutilus* (L.)) in a small lake // Fish. Res. 1989. Vol. 7. P. 289–298. DOI: 10.1016/0165-7836(89)90062-3.

20. *Баранов Ф.*И. Теория и расчет орудий рыболовства. М.: Пищепромиздат, 1939. 965 с.

21. *Сечин* Ю.Т. Математическая модель кривой относительной уловистости жаберных сетей // Рыб. х-во. 1969. № 9. С. 56–58.

22. Mahon R., Khokiattiwong S., Oxenford H. Selectivity of experimental gillnets for fourwing flyingfish, *Hirundichthys affinis*, off Barbados // Environ. Biol. Fish. 2000. Vol. 59. P. 459–463. DOI: 10.1023/A:1026525311594.

23. Millar R. Untangling the confusion surrounding the estimation of gillnet selectivity // Can. J. Fish. Aquatic Sci. 2000. Vol. 55. P. 1328–1337. DOI: 10.1139/f99-275.

24. Tanaka E.A. Method for calculating numerical estimates of gear selectivity curve // Fish. Sci. 2002. Vol. 68. P. 1081–1087. DOI: 10.1046/j.1444-2906.2002.00535.x.

25. Santos M., Gaspar M., Monteiro C., Erzini K. Gill net selectivity for European hake *Merluccius merluccius* from southern Portugal: plications for fishery management // Fish. Sci. 2003. Vol. 69. P. 873–882. DOI: 10.1046/j.1444-2906.2003.00702.x.

26. György A.I., Tata I., Special A. Relationship between horizontal hydroacoustic stock estimates and gill net catches of surface-oriented fish in shallow Lake Balaton (Hungary) // Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems. 2002. Vol. 405. P. 6–23. DOI: 10.1051/kmae/2012012.

27. DuFour M.R., Qian S.S., Mayer C.M., Van der Goot C.S. Evaluating catchability in a large-scale gill net survey using hydroacoustics: making the case for coupled surveys // Fish. Res. 2019. Vol. 211. P. 309–318. DOI: 10.1016/j.fishres.2018.11.009.

28. Millar R. The functional form of hook and gillnet selection curves cannot be determined from comparative catch data alone // Can. J. Fish. Aquatic Sci. 1995. Vol. 52. P. 883–981. DOI: 10.1139/f95–088.

29. *Изнанкин Ю.*А. Уловистость жаберных сетей // Тр. ВНИРО. 1959. Т. 41. С. 124–135.

30. *Никольский Г.В*. Теория динамики стада рыб как биологическая основа рациональной эксплуатации и воспроизводства рыбных ресурсов. М.: Наука, 1965. 382 с.

31. Трещев А.И. Интенсивность рыболовства. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. 236 с.

32. *Сечин* Ю. Т. Математическая модель кривой относительной уловистости жаберных сетей // Рыб. х-во. 1969. № 9.С. 56–58.

33. *Баранов Ф. И.* О биологических основаниях рыбного хозяйства // Изв. Отд. рыбоводства и науч.-пром. исслед. 1918. Т. 1, вып. 1.

34. Lobyrev F., Hoffman M.J. A morphological and geometric method for estimating the selectivity of gill nets // Rev. Fish Biol. Fisheries. 2018. Vol. 28. P. 909–924. DOI: 10.1007/s11160-018-9534-1.

35. Lobyrev F., Hoffman M. J. A method for estimating fish density through the catches of gill nets // Fish. Management Ecol. 2022. Vol. 30. P. 24–36. DOI: 10.1111/feme.12597.

36. Osinov A. G., Volkov A. A., Pavlov D. A. Secondary contact, hybridization, and diversification in Arctic charr (*Salvelinus alpinus* (L.) species complex) from lakes of the Norilo-Pyasinskaya water system, Taimyr: how many forms exist there? // Hydrobiologia. 2022. Vol. 849. P. 2521–2547. DOI: 10.1007/s10750–022–04869-x.

37. Christiansen J. S., Jorgensen E. H., Jobling M. Oxygen consumption in relation to sustained exercise and social stress in Arctic Charr *Salvelinus alpinus* (L.) // J. Exp. Zool. 1991. Vol. 260. P. 149–156. DOI: 10.1002/jez.140260020.

38. Marchand F., Magnan P., Boisclair D. Water temperature, light intensity and zooplankton density and the feeding activity of juvenile brook charr (*Salvelinus fontinalis*) // Freshwater Biol. 2002. Vol. 74. P. 2153–2162. DOI: 10.1046/j.1365-2427.2002.00961.x.

39. Courtney M. B., Scanlo B. S., Rikardsen A. H., Seitz A. C. Marine behavior and dispersal of an important subsistence fish in Arctic Alaska, the Dolly Varden // Environ. Biol. Fishes. 2016. Vol. 99. P. 209–222. DOI: 10.1007/s10641–015–0468–3.

40. Ware D. M. Bioenergetics of pelagic fish: Theoretical change in swimming speed and ration with body size // J. Fish. Res. Board Can. 1978. Vol. 35. P. 220–228. DOI: 10.1139/f78-036.

41. Касумян А. О., Павлов Д. *С.* Стайное поведение рыб. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2018. 274 с.

42. Cui G., Wardle C. S., Glass C. W., Johnstone A. D. F., Mojsiewicz W. R. Light level thresholds for visual reaction of mackerel, *Scomber scombrus* L., to coloured monofilament nylon gill net materials // Fish. Res. 1991. Vol. 10. P. 255–263. DOI: 10.1016/0165-7836(91)90079-u.

43. Wardle C. S., Cui G., Mojsiewicz W. R., Glass C. W. The effect of colour on the appearance of monofilament nylon underwater // Fish. Res. 1991. Vol. 10. P. 243–253. DOI: 10.1016/0165-7836(91)90078 -t.

44. Лобырев Ф. С., Пивоваров Е. А., Хохряков В. Р., Павлов С. Д. Популяционные характеристики плотвы, густеры и окуня в оз. Озерявки (национальный парк «Себежский») // Тр. ВНИРО. 2023. Т. 191. С. 37–52. DOI: 10.36038/2307-3497-2023-191-37-52.

REFERENCES

1. Izmailova A. V., Korneenkova N. Y. Lake area percentage in Russian Federation Territory and its governing factors. *Water Resources.* 2020;47(1):13–21. DOI 10.1134/S009780782001008X.

2. Timoshkin O. A., Samsonov D. P., Yamamura M. et al. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? *Journal of Great Lakes Research.* 2016;42:487–497. DOI: 10.1016/j.jglr.2016.02.011.

3. Volkova N., Kryuchkova G., Mikhaleva T., Polyaeva K., Sharipov R. Biologicheskaya produktivnost' ozera Hanbalyk i ego rybohozyajstvennoe ispol'zovanie = [Biological productivity of lake Khabalyk and efficiency of its use for fishing]. *Vestnik rybokhozyaystvennoy nauki*. 2017;4(3):27–36. (In Russ.).

4. Lukerin A. Yu., Romanenko G. A., Osipov S. A. Produktivnost' Kasmalinskoj ozernoj sistemy Altajskogo kraya = [Productivity of Kashmala lake system of the altai territory]. In: *Ozera Evrazii*: *problemy i puti ikh resheniya*: Materialy II Mezhdunarodnoy konferentsii. Kazan'; 2019. Vol. 2. P. 292–296. (In Russ.).

5. Ushakova A. A., Postnov I. E. Rasprostranenie i chislennost' dvukh vidov ryb (rotana i devyatiigloy kolyushki), yavlyayushchikhsya invazionnymi dlya malykh rek Nizhegorodskoy oblasti. *Vestnik Nizhegorodskoy Gosudarstvennoy Sel'skokhozyaystvennoy Akademii*. 2019;21(1):21–26. (In Russ.).

6. Rafikov R. R., Zakharov A. B., Novoselov A. P. Formirovanie rybnogo naseleniya malyh vodohranilishch Respubliki Komi = [Formation of ichthyofauna in the minor reservoirs of the Komi Republic]. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) Federal'nogo Universiteta. Seriya: Estestvennye Nauki.* 2015;(3):59–67. (In Russ.). DOI: 10.17238/issn2227-6572.2015.3.59.

7. Seleznev V. A., Selezneva A. V., Rakhuba A. V. et al. Kompleksnaya ocenka ekologicheskogo sostoyaniya malyh rek (na primere reki Podstepnovki) = [Integrated assessment of the small rivers ecological status (the Podstepnovka river as a study case)]. *Vodnoe Khozyaystvo Rossii: Problemy, Tekhnologii, Upravlenie*. 2018;(6):83–100. (In Russ.).

8. Shibaev S.V., Sokolov A.V. Metod analiza ikhtiotsenozov malykh vodoemov Kaliningradskoy oblasti na osnove kontrol'nykh oblovov setnymi orudiyami lova. *Trudy VNIRO. Vodnye Biologicheskie Resursy.* 2014;151:158–164. (In Russ.).

9. Ionas V.A. Ob ulovistosti drifternoy seti. *Rybnoe Khozyaystvo.* 1966;(7):43–45. (In Russ.).

10. Kushnarenko A.I., Lugarev E.S. Otsenka chislennosti ryb po ulovam passivnymi orudiyami. In: *Informatsionnoe i matematicheskoe obespechenie issledovaniy syr'evoy bazy*. Sbornik nauchnykh trudov VNIRO. M.; 1985. S. 113–121. (In Russ.).

11. Grachev A.A., Mel'nikov V.N. Razrabotka i primenenie matematicheskikh modeley dlya povysheniya effektivnosti lova ryby / EKINAS. M.: VNIERH; 2003. Vyp. 1. 48 s. (In Russ.).

12. Blinov V.V. O matematicheskikh modelyakh priblizheniya ryby k zhabernoy seti. *Trudy po promyshlennomu rybolovstvu.* TsNIITEiRKh. 1973;1:31–38. (In Russ.).

13. Baranov F.I. Tekhnika promyshlennogo rybolovstva. M.: Pishchepromizdat; 1960. 696 s. (In Russ.).

14. Hamley J.M., Regier H.A. Direct estimates of gillnet selectivity to walleye (*Stizostedion vitreum vitreum*). *Journal of the Fisheries Research Board of Canada.* 1973;30:817–830. DOI: 10.1139/f73–137.

15. Millar R., Fryer R. Estimating the size-selection curves of towed gears, traps, nets and hooks. *Reviews in Fish Biology and Fisheries.* 1999;9:89–116. DOI: 10.1023/A:1008838220001.

16. Denisov L.I. Metodika pryamogo ucheta chislennosti ryb na Kakhovskom vodokhranilishche. *Izvestiya GosNIORKh.* 1977;126:114–125. (In Russ.).

17. Sechin Yu.T. Otsenka chislennosti ryb po ulovam stavnykh setey. In: *Voprosy teorii i praktiki promyshlennogo rybolovstva. Povedenie gidrobiontov v zone deystviya orudiy lova*. M.: VNIRO; 1998. S. 115–118. (In Russ.).

18. Winters G.H., Wheeler J.P. Direct and indirect estimation of gillnet selection curves of Atlantic herring (*Clupea harengus harengus*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences.* 1990;47:460–470. DOI: 10.1139/f90–050.

19. Borgstrøm R. Direct estimation of gill-net selectivity for roach (*Rutilus rutilus* (L.)) in a small lake. *Fisheries Research.* 1989;7:289–298. DOI: 10.1016/0165–7836(89)90062–3.

20. Baranov F.I. Teoriya i raschet orudiy rybolovstva. M.: Pishchepromizdat; 1939. 965 s.

21. Sechin Yu.T. Matematicheskaya model' krivoy otnositel'noy ulovistosti zhabernykh setey. *Rybnoe Khozyaystvo.* 1969;(9):56–58. (In Russ.).

22. Mahon R., Khokiattiwong S., Oxenford H. Selectivity of experimental gillnets for fourwing flyingfish, *Hirundichthys affinis*, off Barbados. *Environmental Biology of Fishes.* 2000;59;459–463. DOI: 10.1023/A:1026525311594.

23. Millar R. Untangling the confusion surrounding the estimation of gillnet selectivity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2000;55:1328–1337. DOI: 10.1139/f99–275.

24. Tanaka E.A. Method for calculating numerical estimates of gear selectivity curve. *Fisheries Science.* 2002;68:1081–1087. DOI: DOI: 10.1046/j.1444–2906.2002.00535.x.

25. Santos M., Gaspar M., Monteiro C., Erzini K. Gill net selectivity for European hake *Merluccius merluccius* from southern Portugal: plications for fishery management. *Fisheries Science.* 2003;69:873–882. DOI: 10.1046/j.1444–2906.2003.00702.x.

26. György A.I., Tata I., Special A. Relationship between horizontal hydroacoustic stock estimates and gill net catches of surface-oriented fish in shallow Lake Balaton (Hungary). *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems.* 2002;405:6–23. DOI: 10.1051/kmae/2012012.

27. DuFour M.R., Qian S.S., Mayer C.M., Van der Goot C.S. Evaluating catchability in a large-scale gill net survey using hydroacoustics: making the case for coupled surveys. *Fisheries Research.* 2019;211:309–318. DOI: 0.1016/j.fishres.2018.11.009.

28. Millar R. The functional form of hook and gillnet selection curves cannot be determined from comparative catch data alone. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1995;52:883–981. DOI: 10.1139/f95–088.

29. Iznankin Yu.A. Ulovistost' zhabernykh setey. *Trudy VNIRO.* 1959;41:24–135. (In Russ.).

30. Nikol'skiy G.V. Teoriya dinamiki stada ryb kak biologicheskaya osnova ratsional'noy ekspluatatsii i vosproizvodstva rybnykh resursov. Moskva: Nauka; 1965. 382 s. (In Russ.).

31. Treshchev A.I. Intensivnost' rybolovstva. M.: Legkaya i Pishchevaya Promyshlennost'; 1983. 236 s. (In Russ.).

32. Sechin Yu.T. Matematicheskaya model' krivoy otnositel'noy ulovistosti zhabernykh setey. *Rybnoe Khozyaystvo.* 1969;(9):56–58. (In Russ.).

33. Baranov F.I. O biologicheskikh osnovaniyakh rybnogo khozyaystva. *Izvestiya Otdela Rybovodstva i Nauchno-Promyshlennykh Issledovaniy.* 1918;1(1). (In Russ.).

34. Lobyrev F., Hoffman M.J. A morphological and geometric method for estimating the selectivity of gill nets. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 2018;28:909–924. DOI: 10.1007/s11160-018-9534-1.

35. Lobyrev F., Hoffman M.J. A method for estimating fish density through the catches of gill nets. *Fisheries Management and Ecology.* 2022;30:24–36. DOI: 10.1111/feme.12597.

36. Osinov A.G., Volkov A.A., Pavlov D.A. Secondary contact, hybridization, and diversification in Arctic charr (*Salvelinus alpinus* (L.) species complex) from lakes of the Norilo-Pyasinskaya water system, Taimyr: how many forms exist there? *Hydrobiologia.* 2022;849:2521–2547. DOI: 10.1007/s10750-022-04869-x.

37. Christiansen J.S., Jorgensen E.H., Jobling M. Oxygen consumption in relation to sustained exercise and social stress in Arctic charr *Salvelinus alpinus* (L.). *Journal of Experimental Zoology.* 1991;260:149–156. DOI: 10.1002/jez.140260020.

38. Marchand F., Magnan P., Boisclair D. Water temperature, light intensity and zooplankton density and the feeding activity of juvenile brook charr (*Salvelinus fontinalis*). *Freshwater Biology*. 2002;74:2153–2162. DOI: 10.1046/j.1365-2427.2002.00961.x.

39. Courtney M.B., Scanlo B.S., Rikardsen A.H., Seitz A.C. Marine behavior and dispersal of an important subsistence fish in Arctic Alaska, the Dolly Varden. *Environmental Biology of Fishes*. 2016;99:209–222. DOI: 10.1007/s10641–015–0468–3.

40. Ware D.M. Bioenergetics of pelagic fish: Theoretical change in swimming speed and ration with body size. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada.* 1978;35:220–228. DOI: 10.1139/f78–036.

41. Kasumyan A.O., Pavlov D.S. Stajnoe povedenie ryb = [Schooling behavior in fish]. Moscow: KMC Scientific Publishers Association; 2018. 274 c. (In Russ.).

42. Cui G., Wardle C.S., Glass C.W., Johnstone A.D.F., Mojsiewicz W.R. Light level thresholds for visual reaction of mackerel, *Scomber scombrus* L., to coloured monofilament nylon gill net materials. *Fisheries Research.* 1991;10:255–263. DOI: 10.1016/0165–7836(91)90079-u.

43. Wardle C.S., Cui G., Mojsiewicz W.R., Glass C.W. The effect of colour on the appearance of monofilament nylon underwater. *Fisheries Research.* 1991;10:243–253. DOI: 10.1016/0165-7836(91)90078 -t.

44. Lobyrev F.S., Pivovarov E.A., Khokhryakov V.R., Pavlov S.D. Populyacionnye harakteristiki plotvy, gustery i okunya v oz. Ozeryavki (nacional'nyj park «Sebezhskij») = [Population parameters of roach, white bream and perch in the lake Ozeryavki (Sebezhsky national park)]. *Trudy VNIRO.* 2023;191:37–52. (In Russ.). DOI: 10.36038/2307-3497-2023-191-37-52.

Научная статья
УДК 539.3
DOI: 10.31857/S0869769824020112
EDN: lculgu

Механическая прочность домиков усоногих рачков из отряда Balanomorpha

А.Л. Попов[✉], А.И. Чава, Н.М. Осипенко, В.М. Козинцев[✉], Д.А. Челюбеев, Е.И. Шифрин, В.О. Мокиевский

Александр Леонидович Попов
доктор физико-математических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского, Москва, Россия
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия
popov@ipmnet.ru
http://orcid.org/0000-0002-4841-5657

Александра Ивановна Чава
инженер
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
cribrilina@gmail.com

Николай Михайлович Осипенко
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского, Москва, Россия
osipnm@mail.ru

Виктор Михайлович Козинцев
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского, Москва, Россия
kozincev@mail.ru

Дмитрий Анатольевич Челюбеев
ведущий инженер
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского, Москва, Россия
da-ch@yndex.ru
http://orcid.org/0000-0003-0594-1785

Ефим Ильич Шифрин
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского, Москва, Россия
shifrin@ipmnet.ru
http://orcid.org/0000-0002-4826-5062

Вадим Олегович Мокиевский
доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
cribrilina@gmail.com
http://orcid.org/0009-0003-2873-0638

Аннотация. Механические испытания фрагментов домиков *Chirona evermanni* из Охотского моря и прикрепленных к каменному субстрату домиков *Balanus eburneus* из Баренцева моря позволили определить размер усилий, необходимых для разрушения фрагментов домиков и целых домиков, прикрепленных к субстрату, а также прочность и трещиностойкость материала раковин. Испытания показали почти десятикратный разброс разрушающего усилия. По уровню трещиностойкости и характеру разрушения материалы домиков *C. evermanni* и *B. eburneus* оказались близки к осадочным горным породам. Разброс значений, полученный в ходе эксперимента, определяется топологическими и морфологическими особенностями домиков.

Ключевые слова: усоногие рачки, обрастания, раковина, субстрат, прочность, разрушение

Для цитирования: Попов А.Л., Чава А.И., Осипенко Н.М., Козинцев В.М., Челюбеев Д.А., Шифрин Е.И., Мокиевский В.О. Механическая прочность домиков усоногих рачков из отряда Balanomorpha // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 2. С. 123–132.
http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020112, EDN: lculgu

Благодарности. Авторы благодарны Д.А. Онищенко за постановку задачи и помощь в работе, М.И. Симакову, Г.А. Колючкиной и В.Л. Сёмину за предоставленные образцы усоногих рачков.

Original article

Mechanical strength of barnacle houses of Balanomorpha

A.L. Popov, A.I. Chava, N.M. Osipenko, V.M. Kozintsev, D.A. Chelyubeev, E.I. Shifrin, V.O. Mokievsky

Aleksander L. Popov
Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Leading Researcher
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia
Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
popov@ipmnet.ru
http://orcid.org/0000-0002-4841-5657

Alexandra I. Chava
Engineer
Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia
cribrilina@gmail.com

Nikolai M. Osipenko
Candidate of Sciences in Technics, Senior Researcher
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia
osipnm@mail.ru

Viktor M. Kozintsev
Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Senior Researcher
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia
kozincev@mail.ru

Dmitri A. Chelyubeev
Leading Engineer
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia
da-ch@yndex.ru
http://orcid.org/0000-0003-0594-1785

Efim I. Shifrin
Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Head of Laboratory
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

shifrin@ipmnet.ru
http://orcid.org/0000-0002-4826-5062

Vadim O. Mokievsky
Doctor of Sciences in Biology, Principal Researcher, Head of Laboratory
Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia
cribrilina@gmail.com
http://orcid.org/0009-0003-2873-0638

Abstract. Mechanical tests of fragments of Chirona evermanni houses from the Sea of Okhotsk and Balanus eburneus houses attached to the stone substrate from the Barents Sea made it possible to determine the amount of effort required to destroy fragments of houses and whole houses attached to the substrate, as well as the strength and crack resistance of the shell material. The tests showed an almost tenfold spread of the destructive force. According to the level of crack resistance and the nature of destruction, the materials of the houses Chirona evermanni and Balanus eburneus turned out to be close to sedimentary rocks. The spread of values obtained during the experiment is determined by the topological and morphological features of the houses.

Keywords: barnacle, fouling, shell, substrate, strength, destruction

For citation: Popov A.L., Chava A.I., Osipenko N.M., Kozintsev V.M., Chelyubeev D.A., Shifrin E.I., Mokievsky V.O. Mechanical strength of barnacle houses of Balanomorpha *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(2):23–132. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020112, EDN: lculgu

Acknowledgments. The authors are grateful to D.A. Onishchenko for setting the task and helping with the work. The authors are grateful to M.I. Simakov, G.A. Kolyuchkina and V.L. Semin for the provided samples of barnacles.

Введение

Любые конструкции, погруженные в воду, служат субстратом для многочисленных организмов, формирующих плотный и прочный покров обрастания. Этот покров может препятствовать нормальному функционированию подводных сооружений, приводя к необходимости регулярной очистки поверхности. Для очистки поверхностей под водой важно иметь представление о механической прочности организмов, доминирующих в обрастании конструкций. Одной из ведущих групп в сообществах обрастания являются усоногие рачки Cirripedia. Работа посвящена представителям одного из отрядов усоногих рачков – Balanomorpha. Эти организмы обладают прочными известковыми домиками в форме усеченного конуса, состоящего из нескольких пластин. Пластины подвижны, что позволяет рачку по-разному вести себя в зависимости от внешних условий. При сильном воздействии волн или в отлив пластины закрывают отверстие в домике, защищая рачка, а при благоприятных условиях они раздвигаются, позволяя ему фильтровать пищевые частицы из толщи воды. Домики прочно прикреплены к поверхности субстрата с помощью выделений особых цементных желез. Прямых измерений механической прочности организмов-обрастателей проведено очень мало. Химическому составу и свойствам цемента, выделяемого усоногими рачками для прикрепления к субстрату, посвящено много публикаций (см. обзор [1]). Гораздо меньше данных имеется о прочности самих домиков и об усилии, необходимом для их разрушения при очистке [2]. Г.Б. Зевина [3] приводит оценки прочности домиков усоногих в диапазоне от 23–57 до 135–145 Н. Напряжение отрыва от субстрата для *Balanus balanoides* составляет до 0,93 МПа [4]. Помимо прямых измерений были попытки моделирования нагрузки на домики усоногих рачков при разной ориентации усилия [5]. При расчете нагрузок следует различать механическую прочность самих домиков, прочность прикрепляющего цемента и силу сцепления цемента с субстратом.

Для проведения механических испытаний домиков рачков были предоставлены две группы образцов. Первая группа состояла из отдельных фрагментов домиков усоногих рачков *Chirona evermanni*, снятых с подводных конструкций в Охотском море. Вторая группа – домики *Balanus eburneus* из Баренцева моря на доломитовых и песчаниковых камнях. Домики отрывали от камней при нагрузках, ориентированных под разными углами к основаниям. Часть домиков располагалась на каменных субстратах поодиночке, но большинство образовывало колонии-сростки от 2 до 13 особей.

Задачей работы была оценка механической прочности стенок домиков двух видов усоногих рачков – *Chirona evermanni* из Охотского моря и *Balanus eburneus* из Баренцева моря. Была определена прочность как фрагментов домиков, так и одиночных особей и колоний-сростков на природном субстрате.

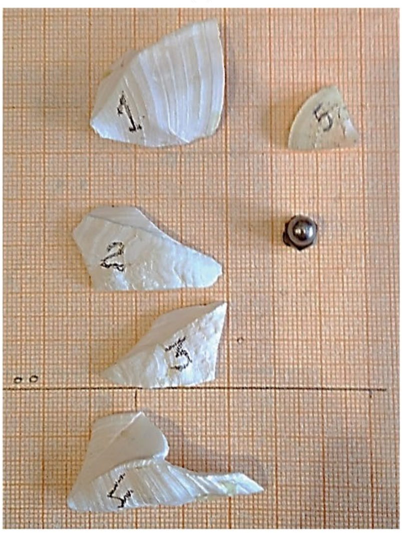
Материал и методы экспериментов

В экспериментах были использованы фрагменты домиков усоногих рачков *Chirona evermanni*, собранных с глубины около 100 м в Охотском море у берегов о-ва Сахалин, зафиксированные 4%-м формальдегидом, а затем высушенные (рис. 1, *а*), и домики *Balanus eburneus*, собранные в юго-восточной части Баренцева моря с глубины 20–30 м, зафиксированные 70%-м этанолом (рис. 1, б). Материал из Баренцева моря включал как отдельные домики, так и группы балянусов на природном субстрате (галька песчаника и доломита величиной 10–15 см).

Нагружение фрагментов проводилось на прессе ДТС-06–100. Выполнялись испытания четырех видов: два – на неподготовленных образцах (рис. 2, *а*, *б*) и два –разрушение специально подготовленных образцов (рис. 2, *в*, *г*). Для второй группы (*Balanus eburneus* в сростках), учитывая особенности прикрепления домиков к субстрату и сложность их формы, была собрана испытательная установка с датчиками силы и перемещения, в которую помещались образцы с основаниями, предварительно закрепленными эпоксидной смолой на металлических подложках. Подложки крепились в установке.

Результаты испытаний

(а)



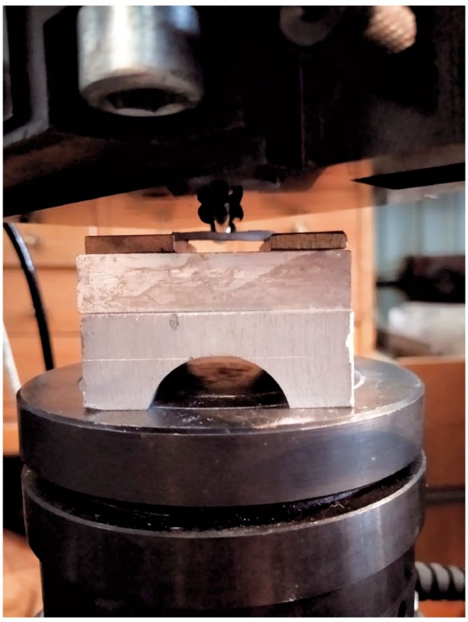
(б)

Рис. 1. Экспериментальный материал: *а* – фрагменты домиков усоногих рачков *Chirona evermanni* (и шарик для локального нагружения), *б* – образцы *Balanus eburneus* на природном субстрате

(а)

(б)

(в)



(г)

Рис. 2. Виды испытаний фрагментов: локальное нагружение шариком (***а***), сдавливание плоскими штампами (***б***), изгиб балочных образцов (***в***), расклинивание стальным клином (***г***)

В табл. 1 представлены результаты испытаний на разрушающее усилие фрагментов домиков *Chirona evermanni* (из Охотского моря), приведены значения средних толщин фрагментов, их массы и разрушающие усилия. Эти фрагменты имели значительную толщину – до 4 мм.

Таблица 1

Результаты испытаний на разрушающее усилие фрагментов домиков *Chirona evermanni*

№	Толщина, мм	Масса, г	Усилие разрушения, Н	Условия разрушения
1	1,6	2,15	192 (до первой трещины)	Давление плоским штампом, крепление на тонком слое пластилина
2	2,8	1,6	104 (до первой трещины)	Давление шариком Ø6 мм на вогнутую сторону. Крепление на пластилине
3	2,9	1,2	300 (до первой трещины)	Давление шариком Ø6 мм на вогнутую сторону. Крепление на пластилине
4	1,2–3,6	2,2	160 (до разламывания пополам)	Давление плоским штампом. Без крепления
5	1,9	0,35	40, 22, 32, 30, 100, 130 (до разламывания на мелкие фрагменты)	Давление плоским штампом. Без крепления

Из имевшегося набора фрагментов были изготовлены два образца-балки. Испытание первого образца шириной b = 7 мм и толщиной h = 2,4 мм при расстоянии между опорами L = 20 мм показало величину разрушающего усилия F = 67 Н. Разрушение второго образца, поменьше (ширина 4,4, толщина 2,5, расстояние между опорами 14 мм), произошло при меньшем усилии F = 37 Н. Рассматривая нагружаемые элементы как балки прямоугольного сечения, можно оценить максимальное напряжение, т. е. локальную прочность, при их изгибе: $\sigma_{max} = M_{max}/W$; $M = FL/4$; $W = bh^2/6$. Оно представляет собой оценку сверху прочности материала раковины при растяжении. Для первого образца σ_{max} = 53 МПа, а для второго – 28,5 МПа.

Также на образцах, имеющих форму, близкую в плане к прямоугольной, была проведена оценка трещиностойкости K_{1C} материала раковин. Это параметр, характеризующий сопротивляемость хрупкому разрушению. Образец с надрезом и расклинивающим устройством показан на рис. 2, *г*. Проведенные эксперименты показали, что величина K_{1C} для данного типа раковин находится в диапазоне 2–4 МПа м^{0,5}. Такой уровень трещиностойкости близок к этому показателю у осадочных горных пород, которые являются обычным природным субстратом для усоногих рачков.

Для имитации прикрепления к природной основе наиболее крупный фрагмент домика с размером в основании 30 мм и высотой 35 мм был приклеен в вертикальном положении к толстой металлической подложке при помощи эпоксидной смолы. Глубина погружения в смолу нижнего края фрагмента была около 5 мм.

Сечение домика имело сложную волнообразную форму: толщина по сечению менялась от 1,5 до 3,2 мм, а максимальный габаритный размер сечения менялся от 3 до 6,5 мм. Установка для испытания образцов на действие боковой нагрузки состояла из рычага для приложения давления к образцу, неподвижной опоры, толкателя с измерителем силы в виде S-образного датчика и измерителя линейного перемещения с точностью 0,1 мкм. Цена деления датчика силы составляла 10 Н. По результатам испытаний был построен график зависимости силы F от перемещения и стенки образца в точке приложения силы (рис. 3). Из этого графика видно, что начальный этап нагружения сопровождался частыми сбросами силы, свидетельствовавшими о появлении мелких трещин и отламывании кусочков стенки образца. Окончательное разрушение произошло при изломе раковины в основании. Максимальная нагрузка, которую выдержал образец, была 220 Н.

Партия образцов из Баренцева моря (рис. 1, *б*) состояла из трех групп домиков *Balanus eburneus на природном субстрате – камнях, к которым прикрепились рачки*. При испытаниях камни с домиками приклеивались эпоксидной смолой к металлическим подложкам так, чтобы плоский пуансон при движении давил только на домик. В качестве иллюстрации показан образец № 1 (рис. 1, *б*) перед испытанием (рис. 4, а) и после отрыва домика от субстрата (рис. 4, б). Стрелкой показано направление нагружения.

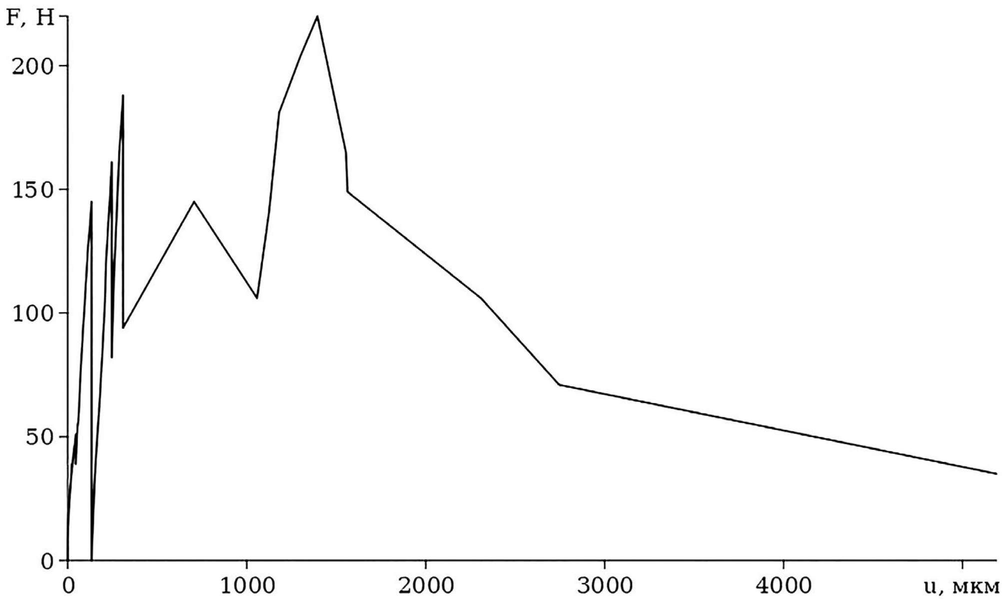


Рис. 3. Диаграмма нагружения крупного фрагмента раковины

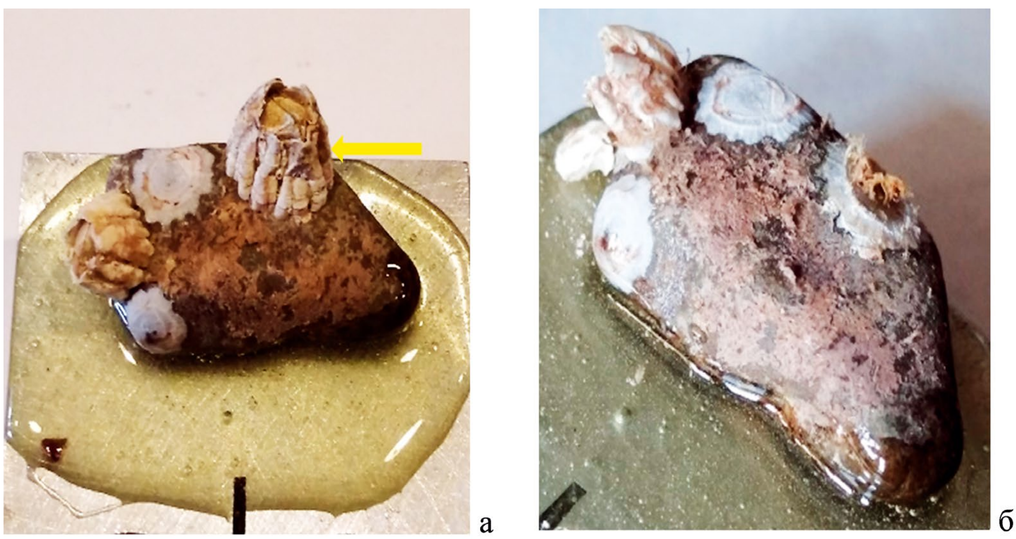


Рис. 4. Образец № 1 (см. рис. 1, *б*) до (*а*) и после (*б*) разрушения нагруженного домика; стрелкой показано направление усилия

Результаты измерений разрушающей нагрузки домиков *Balanus eburneus*, прикрепленных к камням, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений разрушающей нагрузки домиков усоногих рачков *Balanus eburneus* на камнях из Баренцева моря

Образец	Максимальная разрушающая нагрузка, Н	Количество домиков в группе. Характерные размеры: диаметр вершины / диаметр основания / высота, мм	Примечание
1	60	Один домик. 12 / 16 / 14.	–
2	60	Два. 12 /15 /16 и 12 / 13 / 16	–
3	65	Один. 11 / 12 / 15	–
3	85	Один. 10,5 / 11,5 / 14	Ориентация домика – под углом 45° к вертикали
4	90	Сросток из трех домиков. 13 / 13 / 16	–
4	165	Два. 12 / 12 / 16 и 12 / 12 / 16	–
4	28	Один. 12 / 14 / 15	Ориентация под углом 30° к основанию
5	40/40/27/ 210	Сросток из семи домиков. (10–15) / (10–12) / (14–20)	Четыре стадии разрушения при нагружения
6	60 и 46	Девять в сростке. (6–8) / (7–12) / (7–11)	Две стадии разрушения
7	40/40/28/16/28	Тринадцать в сростке. (9–11) / (6–15) / (17–19)	Сросток из 13 домиков, пять стадий разрушения
8	23/65/42/26/46/ 16/50/50	Тринадцать в сростке. (9–13) / (7–15) / (13–22)	Сросток из 13 домиков, восемь стадий разрушения
9	130	Один. 23 /14 / 30	Один крупный домик
10	125/80	Три в сростке. (6–9) / (8–10) / (9–10)	Сросток из 3 домиков, две стадии разрушения

Испытания показали большой разброс разрушающего усилия – от 23 до 210 Н.

Обсуждение результатов

Ранее в экспериментах с *Balanus balanoides* [4] было показано, что напряжение отрыва домика от субстрата находится в пределах от 0,17 до 0,90 МПа. Сходные величины получены и для другого вида, *Balanus improvisus*: сдвиговые нагрузки при отрыве домика от субстрата были в пределах 0,05–0,30 МПа [6]. В этом исследовании авторы не выявили связи между прочностью прикрепления и шероховатостью поверхности субстрата. Близкий результат был получен и для *Balanus amphitrite*: 0,02–0,30 МПа [7].

Наши данные показали большой разброс прочностных характеристик домиков двух видов усоногих рачков из отряда Balanomorpha – *Chirona evermani* и *Balanus eburneus*. Разброс уровней нагрузки при отрыве объясняется видовой принадлежностью, индивидуальными размерами, структурой домиков и пространственной организацией поселений балянусов на субстрате. Прочностные характеристики стенок домиков, прочность их соединения с донцем и сила сцепления донца с субстратом находятся в одном и том же диапазоне значений. Аналогичные испытания других авторов [8, 9] показали, что по уровню трещиностойкости и характеру разрушения материал фрагментов домиков *Chirona evermanni* и домиков *Balanus eburneus* близок к осадочным горным породам, таким как известняк, песчаник, сланец.

Вторая группа – домики *Balanus eburneus* из Баренцева моря с естественным прикреплением к камням – испытывалась на отрыв от каменного субстрата при нагрузках, ориентированных под разными углами к основаниям. Общее количество домиков во всех образцах – 57. Часть домиков располагалась на каменных субстратах изолированно, но большинство образовывало колонии от 2 до 13 особей. Испытания на разрушение этой группы образцов показали следующие результаты: изолированные домики выдерживали максимальную нагрузку с большим разбросом – от 30 до 90 Н, а наиболее крупные – до 130 Н. Сростки домиков обычно разрушались постепенно, частями по нескольку домиков в течение одного нагружения. Домики только двух образцов сростков разрушились одновременно. Процесс протекал как постепенное дробление домика на части, так и отрыв целого корпуса или выступающей части домика от донышка-основания. Донце (основание домика) иногда разрушалось без существенного остатка, когда на камне оставалось только пятно – след от домика, но иногда оставался довольно прочно прикрепленный остаток донца, хорошо видный на камнях после разрушения домиков, например, как на рис. 4. Разброс разрушающих нагрузок для сростков аналогичен разбросу этих нагрузок для изолированных домиков.

Заключение

Фрагменты домиков усоногих рачков *Chirona evermanni*, снятых с подводных конструкций, расположенных в Охотском море, с толщиной раковины до 3–4 мм, обладают достаточно высокой прочностью: максимальное разрушающее усилие при изломе в основании одного из образцов было 220 Н. Для более мелких и тонкостенных домиков *Balanus eburneus* максимальные разрушающие усилия были 130 Н для изолированных домиков и 210 Н для сростков из нескольких домиков. Разброс значений, полученный в ходе эксперимента, зависел также от топологических и морфологических особенностей домиков.

Результаты экспериментов с этими образцами показывают хрупкий характер разрушения домиков при квазистатическом нагружении.

Разброс разрушающих нагрузок для сростков сходен с таковым для изолированных домиков. Из совокупности проведенных экспериментов можно также заключить, что прочность частей домиков при сдвигающих нагрузках немного превышает прочность их связей с каменным основанием, что, однако, не требует задействования дополнительных процессов при очистке субстрата от оснований домиков.

По уровню трещиностойкости и характеру разрушения материал домиков обрастания близок к осадочным горным породам, таким как известняк, песчаник, сланец. Этот факт может быть полезным при анализе способов механического воздействия на продукты обрастания и выборе наиболее эффективного способа очистки поверхностей от обрастаний.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kamino K. Mini-review: Barnacle adhesives and adhesion // Biofouling. 2013. Vol. 29, N6. P. 735–749.
2. Yule A.B., Walker G. Barnacle biology. Ch. Adhesion in barnacles. Routledge, 1987. P. 389–402.
3. Зевина Г.Б. Биология морского обрастания. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1994. 134 с.
4. Yule A.B., Walker G. The adhesion of the barnacle, *Balanus balanoides*, to slate surfaces // Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. 1984. Vol. 64, N1. P. 147–156.

5. Li C., Wang G., Chen K., Yun F., Wang L. Mechanical analysis of a scraping method to remove attached barnacles // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. Vol. 8, N3. P. 150.

6. Petersen D., Gorb S., Heepe L. The influence of material and roughness on the settlement and the adhesive strength of the barnacle *Balanus improvisus* in the Baltic Sea // Frontiers in Marine Science. 2020. Vol. 7. https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00664.

7. Holm E.R., Kavanagh C.J., Orihuela B., Rittschof D. Phenotypic variation for adhesive tenacity in the barnacle *Balanus amphitrite* // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 2009. Vol. 380, iss. 1–2. P. 61–67.

8. Баклашов И.В. Деформирование и разрушение породных массивов. М.: Недра, 1988. 271 с.

9. Roy D.G., Singh T.N., Kodikara J., Talukdar M. Correlating the mechanical and physical properties with mode-I fracture toughness of rocks // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2017. Vol. 50. P. 1941–1946.

REFERENCES

1. Kamino K. Mini-review: Barnacle adhesives and adhesion. *Biofouling*. 2013;29(6):735–749.

2. Yule A.B., Walker G. Adhesion in barnacles. In: *Barnacle biology*. Routledge, 1987. P. 389–402.

3. Zevina G.B. Biologiya morskogo obrastaniya = [Biology of marine fouling]. Moskva: Izd-vo Moskovskogo universiteta; 1994. 134 s. (In Russ.).

4. Yule A.B., Walker G. The adhesion of the barnacle, *Balanus balanoides*, to slate surfaces. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom.* 1984;64(1):147–156.

5. Li C., Wang G., Chen K., Yun F., Wang L. Mechanical analysis of a scraping method to remove attached barnacles. *Journal of Marine Science and Engineering.* 2020;8(3):150.

6. Petersen D., Gorb S., Heepe L. The influence of material and roughness on the settlement and the adhesive strength of the barnacle *Balanus improvisus* in the Baltic Sea. *Frontiers in Marine Science*. 2020;7. https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00664.

7. Holm E.R., Kavanagh C.J., Orihuela B., Rittschof D. Phenotypic variation for adhesive tenacity in the barnacle *Balanus amphitrite*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology.* 2009;380(1–2):61–67.

8. Baklashov I.V. Deformirovaniye i razrusheniye porodnyh massivov = [Deformation and destruction of rock massifs]. M.: Nedra; 1988. 271 s. (In Russ.).

9. Roy D.G., Singh T.N., Kodikara J., Talukdar M. Correlating the mechanical and physical properties with mode-I fracture toughness of rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2017;50:1941–1946.

Научная статья
УДК: 576. 895.121
DOI: 10.31857/S0869769824020125
EDN: lctqjo

Возбудители цестодозов людей в Приморском крае

А.В. Ермоленко✉, А.Ф. Попов, Г.А. Захарова, В.Н. Котельников

Алексей Васильевич Ермоленко
кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН,
Владивосток, Россия
ermolenko_alexey@mail.ru
http://orcid.org/0000-0002-6316-7831

Александр Федорович Попов
доктор медицинских наук, профессор
Тихоокеанский государственный медицинский университет, Владивосток, Россия;
Дальневосточный филиал Государственного научно-исследовательского испытательного института военной медицины МО РФ, Владивосток, Россия;
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
doctor.popov@mail.ru
http://orcid.org/0000-0002-5166-5569

Галина Адольфовна Захарова
заведующая эпидемиологическим отделением особо опасных и паразитарных заболеваний
Центр гигиены и эпидемиологии в Приморском крае, Владивосток, Россия
galinazaharova@gmail.ru
http://orcid.org/0009-0009-5702-4357

Владимир Николаевич Котельников
доктор медицинских наук, профессор
Дальневосточный филиал Государственного научно-исследовательского испытательного института военной медицины МО РФ, Владивосток, Россия
671235@mail.ru
http://orcid.org/0000-0001-5830-1322

Аннотация. Представлены сведения о видовом составе, распространении и жизненных циклах возбудителей цестодозов людей в Приморском крае. Потенциально опасными для людей в этом регионе являются 18 видов цестод, однако по официальным данным выявлены только возбудители гименолепидоза, тениаринхоза, тениоза, эхинококкоза, дифиллоботриоза. Рассматриваются вопросы диагностики, лечения и меры профилактики заболеваний.

Ключевые слова: Приморский край, возбудители цестодозов людей, распространение, лечение

Для цитирования: Ермоленко А.В., Попов А.Ф., Захарова Г.А., Котельников В.Н. Возбудители цестодозов людей в Приморском крае // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 2. С. 133–144. http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020125, EDN: lctqjo

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы гос. задания РАН № 121031000154-4.

Original article

Causes of cestodoses in humans in Primorsky Region

A. V. Ermolenko, A. F. Popov, G. A. Zakharova, V. N. Kotelnikov

Alexey V. Ermolenko
Candidate of Sciences in Biology, Senior Researcher
Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok, Russia
ermolenko_alexey@mail.ru
http://orcid.org/0000-0002-6316-7831

Alexandr F. Popov
Doctor of Sciences in Medicine, Professor
Pacific State Medical University of the Ministry of Health of Russia, Vladivostok, Russia;
Far Eastern Branch of the State Research and Testing Institute of Military Medicine of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Vladivostok, Russia;
Far East Federal University, Vladivostok, Russia
doctor.popov@mail.ru
http://orcid.org/0000-0002-5166-5569

Galina A. Zakharova
Head of the Department of Parasitology
Federal State Healthcare Institution "Center of Hygiene and Epidemiology in Primorsky Krai", Vladivostok, Russia
galinazaharova@gmail.ru
http://orcid.org/0009-0009-5702-4357

Vladimir N. Kotelnikov
Doctor of Sciences in Medicine, Professor
Far Eastern Branch of the State Research and Testing Institute of Military Medicine of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Vladivostok, Russia
671235@mail.ru
http://orcid.org/0000-0001-5830-1322

Abstract. The article presents information about the species composition, distribution and life cycles of human cestodosis pathogens in Primorsky Krai. Potentially dangerous for people in this region are 18 species of cestodes, however, according to official data, only causative agents of hymenolepiasis, teniarhynchosis, teniasis, echinococcosis, and diphyllobothriasis have been identified. The issues of diagnosis, treatment and preventive measures of diseases are considered.

Keywords: Primorsky Region, causative agents of cestodoses in humans, distribution, treatment, prevention

For citation: A. V. Ermolenko, A. F. Popov, G. A. Zakharova, V. N. Kotelnikov. Causes of cestodoses in humans in Primorsky Region. *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(2):133–144. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020125, EDN: lctqjo

Funding. The work was carried out within the framework of the state theme RAS assignment. No 121031000154-4.

Введение

Среди плоских червей (тип Platyhelminthes Gegenbaur, 1859) ленточные черви (класс Cestoda Rudolphi, 1808) включают наиболее крупных представителей данного таксона (иногда длиной до 20 м). Они являют собой далеко зашедший случай приспособления к паразитическому образу жизни, что отражается как в их морфологии (отсутствие пищеварительной системы и фактически всех органов чувств у взрослых червей), так и в том, что свободноживущая стадия у них сокращена практически до стадии яйца. Развитие этих гельминтов осуществляется как напрямую, так и со сменой 1–2 промежуточных хозяев. Окончательными хозяевами этих гельминтов чаще всего служат позвоночные животные, включая человека.

Приморский край является частью ареала по крайней мере 18 видов гельминтов, когда-либо зарегистрированных у людей в разных частях земного шара и потенциально опасных для них [1]. Однако только часть из них была найдена у людей на этой территории. Зарегистрированные цестодозы – гименолепидоз, эхинококкоз, тениоз, тениаринхоз и дифиллоботриоз.

Цель исследования – определить возбудителей цестодозов и промежуточных хозяев в Приморском крае, изучить эпидемиологию и клинику заболевания с начала этого века.

Материалы и методы

Материалами для работы послужили данные эпидемиологического обследования 400 случаев заболевания цестодозами, полученные в ФГУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Приморском крае», истории болезни и амбулаторные карты 400 пациентов за период с 2000 по 2022 г. Статистический анализ проводился с использованием программы Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Из обнаруженных у людей в Приморье цестод наиболее простой жизненный цикл имеет возбудитель гименолепидоза карликовый цепень *Hymenolepis nana* (Siebold, 1852) из сем. Hymenolepididae Ariola, 1899. Это относительно мелкий червь (до 3 см во взрослом состоянии). В его жизненный цикл могут включаться промежуточные хозяева (блохи или мучные жуки), но чаще заражение происходит напрямую, при попадании в желудочно-кишечный тракт яиц, контактным или фекально-оральным путем (разносчиками яиц могут быть мухи и тараканы). Личинки червя поселяются между ворсинок тонкого кишечника, а взрослые черви (половозрелыми они становятся через две недели после заражения) – в его просвете [2, 3].

Симптомами гименолепидоза являются изменение аппетита, местами острые боли в животе, кровь и слизь в стуле, отрыжка, тошнота, рвота, аллергические реакции, нарушения работы центральной нервной системы, головные боли, плаксивость, эпилептиморфные судороги. Для лечения используют празиквантел [4].

Этот цестодоз регистрируется в большинстве районов края, но относительно нечасто, причем в основном у взрослых (хотя к группе повышенного риска в литературе относят детей). Так, за период с 2000 по 2022 г. на территории Приморья выявлено 68 случаев данного заболевания (см. таблицу), из которых только 13 – у детей.

Следует отметить, что относительно малые размеры паразита предопределяют возможное течение данного заболевания бессимптомно при единичной интенсивности инвазии, так что число заразившихся людей может быть на 1–2 порядка больше (особенно это относится к детям с их обычными «детскими болячками»). Кроме того, точная видовая диагностика врачами-эпидемиологами как правило не осуществляется (да это и невозможно в случае применения при лечении гельминтозов празиквантела – антигельминтика, убивающего паразита и делающего его доступным для переваривания ферментами организма хозяина). Поэтому не исключено, что возбудителем гименолепидоза в регионе может быть не только *H. nana*.

Годовая динамика заболеваемости цестодозами за 2000–2022 гг. в Приморском крае (число заболеваний/показатель* на 100 тыс. населения)

Год	Тениаринхоз	Тениоз	Гименолепидоз	Дифиллоботриоз	Эхинококкоз
2000	1/0,05	1/0,05	9/0,41	30/1,37	2/0,09
2001	4/0,18	3/0,14	9/0,41	20/0,92	1/0,05
2002	–	5/0,23	8/0,37	16/0,74	1/0,05
2003	3/0,14	1/0,05	4/0,19	33/1,55	1/0,05
2004	2/0,10	–	3/0,14	23/1,09	2/0,10
2005	–	1/0,05	1/0,05	26/1,26	4/0,19
2006	1/0,05	2/0,10	2/0,10	35/1,73	2/0,10
2007	–	1/0,05	4/0,20	9/0,45	–
2008	–	–	6/0,31	12/0,62	1/0,05
2009	–	1/0,05	3/0,16	9/0,47	–
2010	–	–	1/0,05	7/0,37	2/0,10
2011	–	–	4/0,21	7/0,37	–
2012	2/0,11	–	4/0,21	7/0,37	1/0,05
2013	1/0,05	–	1/0,05	7/0,38	1/0,05
2014	2/0,11	–	–	2/0,11	1/0,05
2015	–	–	1/0,05	4/0,22	4/0,22
2016	–	–	1/0,05	5/0,27	1/0,05
2017	–	–	1/0,05	2/0,11	1/0,05
2018	1/0,05	–	2/0,11	5/0,27	1/0,05
2019	–	–	1/0,05	1/0,05	3/0,16
2020	–	–	2/0,11	2/0,11	1/0,05
2021	–	–	1/0,05	3/0,16	1/0,05
2022	–	–	–	3/0,17	–
Всего	17/0,84	15/0,71	68/3,36	268/13,16	32/1,64

* Показатель инцидентности (заболеваемости) на 100 тыс. населения рассчитан по формуле: $I = A \cdot K/N$, где I – интенсивный показатель в $^{o}/_{oooo}$ (просантимиле), A – абсолютное число случаев заболеваний, K – коэффициент $^{o}/_{oooo}$ (100 000), N – численность населения для текущего года.

Примечание. Прочерк – заболевание не зарегистрировано.

У людей (не в пределах Приморского края) был отмечен еще один вид цестод из данного рода – крысиный цепень *Hymenolepis diminuta* (Rudolphi, 1819). Обычными окончательными хозяевами этого червя являются мышевидные грызуны, а промежуточными служат насекомые – тараканы, мельничные огневки, мучные жуки, уховертки, блохи. Чаще всего очаги инфекции окончательных хозяев возникают в амбарах, кладовых, зерновых складах, мукомольных цехах. Изредка случайными факультативными хозяевами могут стать люди, собаки, кошки, обезьяны, проглотившие зараженное насекомое. В Приморье, помимо нескольких видов грызунов [5], эта цестода найдена еще у уссурийской могеры *Mogera robusta* Nehring [6]. Заражение людей может происходить при употреблении непропеченного хлеба с мучными жуками, с зерновыми культурами, загрязненными фекалиями грызунов, при несоблюдении правил личной гигиены, санитарии [7].

Симптомы заболевания выражаются в основном в легкой диарее, но поскольку инвазирование людей происходит случайно, то чаще всего – единичными червями, что серьезных последствий не вызывает. При средней или высокой интенсивности инвазии не исключены симптомы, схожие с таковыми при гименолепидозе, вызываемом карликовым цепнем, но более выраженные, тем более что данные черви могут достигать более крупных размеров, чем *H. nana* (до 60 см). Более точно вид возбудителя можно определить при анализе фекалий больного. Внешне яйца обоих видов сходны, но у *H. nana* они прозрачные и имеют размеры 36–43 × 45–53 мкм

[8], тогда как у *H. diminuta* они почти вдвое крупнее (70–86 × 60–70 мкм) и имеют явный коричневый оттенок, так как их оболочка интенсивно воспринимает цвет испражнений [7, 8].

По официальным данным инвазия *H. diminuta* у людей в Приморье не зарегистрирована, но точная видовая идентификация при гельминтозах врачами-лаборантами обычно не проводится. Вообще, инвазия людей этим гельминтом отмечена в Юго-Восточной Азии, Индонезии и на Антильских островах, и случаев заражения не так много [9].

Потенциально опасными для человека могут считаться распространенные повсеместно (на юге Дальнего Востока у людей их не находили) еще два представителя гименолепидид – *Microsomacanthus microsoma* (Creplin, 1829) и *Drepanidotaenia lanceolata* (Bloch, 1782), обычными окончательными хозяевами которых являются в основном утиные птицы, промежуточными – разные планктонные и бентосные ракообразные [10].

В крае относительно редко, но регулярно регистрируются случаи заражения людей солитерами – бычьим (невооруженным) *Taeniarhynchus saginatus* (Goeze, 1782) и свиным (вооруженным) *Taenia solium* (Linné, 1758) цепнями (сем. Taeniidae Ludwig, 1866), достигающими максимальных размеров 10 (иногда указывается, что 14) и 6 м соответственно.

Промежуточными хозяевами бычьего цепня являются коровы, яки, зебу, буйволы, северные олени. У последних личинки (финны) локализуются только в полушариях переднего мозга и мозжечке, у полорогих – преимущественно в скелетных мышцах [11]. Человек для этой цестоды является единственным окончательным хозяином.

Симптомы тениаринхоза связаны прежде всего с повреждением слизистой тонкого кишечника в месте прикрепления паразита (с возможным некрозом и атрофией, а иногда и перфорацией кишки), а также с «гофрированным» расположением червя (что ведет к распиранию стенок кишки и возникновению висцеро-висцеральных рефлексов) и прохождению отделившихся члеников по просвету желудочно-кишечного тракта, что вызывает болевой синдром. Кроме того, в результате жизнедеятельности паразита могут отмечаться гиперсаливация, метеоризм, боли в животе, диарея, нарушения аппетита, судороги, бессонница, головокружения.

Диагностика тениаринхоза основывается на обнаружении зрелых члеников и яиц паразита при перианальных соскобах и копроскопии.

По официальным данным в Приморье с 2000 по 2022 г. зарегистрировано 17 случаев заражения людей бычьим цепнем (см. таблицу). Источником заражения служило недостаточно обработанное термически мясо коров. Как следует из изучения анамнезов, все эти случаи заражения приходились на питание говядиной, произведенной для собственного употребления или проданной на стихийных рынках, т. е. не прошедшей ветеринарное обследование.

Есть еще одна возможность заражения людей в Приморье бычьим цепнем. В недалеком прошлом из Таиланда туристами часто завозилось «средство для похудания», состоящее из капсулы и таблетки (в связи с пандемией число отдыхающих сегодня свелось к минимуму). Капсула содержала живую личинку бычьего цепня (финну), а таблетку (антигельминтик) следовало выпивать через полгода после проглатывания капсулы. Здесь следует помнить, что противоглистные лекарства назначаются с учетом веса, возраста и физиологического состояния больного. В противных случаях они могут вызвать интоксикацию с последствиями разной тяжести (при передозировке) или доза может оказаться недостаточной для изгнания паразита. Число заразившихся бычьим цепнем людей при приеме данного «лекарства» точно не известно, поскольку обычно они в клиники не обращались, соответственно и официальной статистикой не учитываются.

Основными промежуточными хозяевами *Taenia solium* являются свиньи, но могут инвазироваться и другие млекопитающие (кошки, собаки, зайцеобразные, приматы). Единственным окончательным хозяином, как и для невооруженного цепня, служит человек.

Симптомы при кишечном тениозе в принципе сходны с таковыми при тениаринхозе, но диагностика сводится лишь к обнаружению яиц червя при копроскопии или соскобах в перианальных складках (зрелых члеников эти черви не отделяют) [5, 11].

За последние 22 года в крае зарегистрировано 15 случаев кишечного тениоза (см. таблицу), все заражения произошли от свинины, купленной на стихийных рынках или у соседей, а также от самостоятельно выращенных животных.

Следует отметить, что физиологически организмы человека и свиньи сходны, поэтому при попадании яиц или зрелых члеников червей в желудок возможно заражение людей цистицеркоидами (в дополнение к оральному варианту инвазирования – при проглатывании зрелых яиц цестоды из контаминированной воды, пищи или почвы). Цистицеркоз, вызываемый личинками *T. solium*, в Приморье официально не регистрировался, но довольно широко распространен. Глобальная зараженность людей этими личинками оценивается в 5–6 млн ежегодно. Цистицерки чаще всего локализуются в центральной нервной системе (ЦНС), глазах, а также в мышцах, сердце, легких, подкожной клетчатке. Подкожный или мышечный цистицеркоз протекает бессимптомно (по крайней мере до смерти цистицерков), а поражения головного мозга или глаз чреваты достаточно серьезными последствиями. Основными очагами заражения считаются свиноводческие хозяйства [12].

В крае отмечен еще один вид цестод рода *Taenia*, который на стадии личинки был найден у людей в иных регионах, – собачий цепень *T. hydatigena* (Pallas, 1776). Взрослый червь встречается у хищных млекопитающих (собак, волков, енотовидных собак, леопардов, рысей, куниц, медведей), а личинки – у грызунов, зайцеобразных, копытных, хищников, приматов (включая человека). У людей на территории России цистицеркоиды обнаруживались в печени и брюшной полости [5, 12].

В Хабаровском крае у трех видов хищных куньих млекопитающих (колонка *Kolonocus sibirica* (Pallas), американской норки *Lutreola vison* Schreber и соболя *Martes zibellina* Linné) была найдена *Taenia martis* (Zeder, 1803) [5, 13]. Нахождение этой цестоды в пределах края не исключено. Промежуточными хозяевами ее являются в основном насекомоядные и грызуны, но случайно – и человек (зарегистрировано очень небольшое количество случаев, и не на Дальнем Востоке). Локализация личинок у людей – глаза, ЦНС, брюшная полость [12].

Препаратом выбора для лечения тениидозов является празиквантел из расчета 25 мг/кг массы тела. Однократный прием приводит к излечению в 90% случаях. Может потребоваться проведение повторных курсов лечения.

К семейству Taeniidae относятся и представители рода *Echinococccus* Rudolphi, 1801 – черви, использующие в качестве окончательных хозяев в основном хищных псовых млекопитающих (в Приморье взрослые черви обнаружены нами у волков *Canis lupus* Linné, собак *C. familiaris* Linné, лисиц *Vulpes vulpes* (Linné), енотовидных собак *Nyctereutes procyonoides* (Gray)), а промежуточных – копытных, мозоленогих и всеядных млекопитающих, включая человека [1, 5] Яйца паразита выходят наружу как по отдельности, так и в «пакетах», с концевыми члениками. Эти конечные членики могут отползать от фекалий окончательного хозяина на расстояние до 25 см, где разлагаются, оставляя яйца на земле или на траве. Заражение промежуточных хозяев происходит при заглатывании яиц вместе с травой или при контакте с шерстью зараженных животных. Финка в промежуточных хозяевах может локализоваться в различных внутренних органах (почках, печени, мышцах, сердце, легких, стенках кишечника, головном мозге). При этом финки приступают к бесполому размножению (почкованию), образуя так называемый эхинококковый пузырь весом до нескольких (иногда до 50) кг [14].

Гидатидный эхинококк может поражать все органы без исключения, и этим определяются характер и выраженность симптоматики. Начало клинических проявлений связывают со сдавливанием растущей кистой того или иного органа, а затем с развитием различных осложнений, таких как нагноение, прорыв кисты в плевральную или брюшную полость. Печень поражается в 85% случаев. Легкие поражаются эхинококком редко (в 10–15%), чаще – нижние доли. В начальном периоде эхинококкоза изменения в легком обнаруживаются случайно при рентгенологическом исследовании. Эхинококковая киста на рентгенограмме выглядит как круглая тень с четкими контурами, которая становится овальной при дыхательных экскурсиях грудной клетки (симптом Неменова). Клиническая картина эхинококкоза легких многообразна. Боли в грудной клетке являются частым симптомом и встречаются в 50,8% случаев. Первоначально боли периодические, а затем становятся постоянными, усиливаются при глубоком дыхании и кашле. В 90% случаев боли ощущаются на стороне локализации кисты, в 4% – на противоположной стороне и в 6% распространяются по всей грудной клетке. Кашель – также сравнительно ранний и важный симптом эхинококкоза легких, встречается у 45,5% больных. Кашель обычно сухой, немотивированный, не поддается медикаментозному лечению. По мере увеличения эхинококковой кисты меняется и характер мокроты: сухой кашель сменяется кашлем с небольшим количеством слизистой или слизисто-гнойной мокроты нередко с прожилками крови. Это является следствием воспалительного процесса вокруг кисты. Кровохарканье встречается в 33,6% случаев, оно является важным признаком, составляя с болью и кашлем триаду, характерную для эхинококкоза легких. Одышка отмечается в 8,7% случаев, она является поздним признаком заболевания, симптомом большой кисты, сдавливающей главный бронх, или проявлением множественного эхинококкоза легкого. Повышение температуры наблюдается у 27,3% больных с неосложненной стадией эхинококкоза. Оно связано с токсико-аллергическим воздействием эхинококковой жидкости на организм, асептическим или бактериальным воспалительным процессом вокруг эхинококковой кисты или хроническим воспалительным процессом в ателектатическом участке легкого [15].

Ларвальный эхинококкоз на начальных этапах развития эхинококкового пузыря (до образования вокруг него фиброзной капсулы) иногда может быть излечен альбендазолом. Более поздние стадии удаляются только хирургически [16].

Эхинококкоз регистрируется у людей в Приморье достаточно регулярно, в разных районах, но обычно не чаще чем 1–2 раза в год. Так, с 2000 по 2022 г. было зарегистрировано всего 32 заражения этим паразитом. В большинстве случаев кисты формировались в печени, реже в легких, один раз одновременно в почке и печени. В одном случае в г. Находка при патологоанатомическом обследовании человека, умершего по официальной версии от рака легких, в легких был найден эхинококковый пузырь.

Следует подчеркнуть, что эхинококк может циркулировать и в природных условиях с участием в качестве окончательных хозяев не только собак. Так, по данным сотрудников ветеринарного Управления Пограничного района Приморья в 2017 г. наблюдалась практически стопроцентная зараженность свиней в одном из свиноводческих комплексов. При этом местные собаки были не заражены этим гельминтом. Соответственно с уверенностью можно утверждать, что источником заражения свиней были дикие млекопитающие. Поскольку волки в зонах совместного обитания вытесняются тиграми (а Пограничный район является частью ареала этих кошек), то скорее всего заражение свиней происходило при контакте с продуктами жизнедеятельности лис или (и), что более вероятно, енотовидных собак.

Во всех случаях обнаружения в Приморье цестод рода *Echinococcus* их определяли как *E. granulosus* (Batsch, 1786). Однако в последние десятилетия (в основном по молекулярно-генетическим данным) было установлено, что этот вид скорее всего комплексный, включающий не менее десятка различных видов [17, 18]. К какому (или каким) из них относятся обнаруживаемые в Приморье черви, еще предстоит установить.

В род *Echinococcus* переведен *Alveococcus multilocularis* (Leuckart, 1863). Этот паразит также может размножаться на личиночной стадии (промежуточными хозяевами чаще являются грызуны, но могут быть и люди), но пузырьки почкуются только снаружи от исходной цисты. В Приморье его нет, но он обнаружен на севере Сахалина [19].

Из встречавшихся у людей цестод тениид на юге Дальнего Востока найдена еще *Hydatigera taeniaeformis* (Batsch, 1786). Окончательными хозяевами ее являются кошачьи, реже – псовые, промежуточными – обычно мышевидные грызуны [5], крайне редко (случайно) – человек [20]. У людей в Приморье этот паразит не зарегистрирован.

Долгое время считалось, что единственным возбудителем дифиллоботриоза человека в России в целом и на Дальнем Востоке в частности является один представитель рода *Diphyllobothrium* – *D. latum* (Linné, 1758) (сем. Diphyllobothriidae Lűhe, 1910) (указывается в качестве причины заболевания более чем в 80% случаев). Основным вторым промежуточным хозяином этой цестоды являются рыбы рода *Esox* Linné, щуки, а в их ареале – и другие хищные рыбы (окуни и налим). Однако вскрытие этих рыб (щук обследовано 220 экз.) на наличие личинок широкого лентеца дало отрицательный результат [21]. Более того, те анамнезы заболеваний, которые удалось изучить, прямо указывали на морских рыб в качестве источника заражения лентецами данного рода – лососей и корюшек. Те стробилы взрослых червей, которые были выделены из людей и которые удалось изучить, свидетельствуют о паразитировании у человека в Приморье *D. nihonkaiense* Yamane, Kamo, Bylund et Wikgren, 1986 и *D. orcini* Hatsushika et Shirouzu, 1990. Плероцеркоиды *D. nihonkaiense* были найдены нами у кеты *Oncorhynchus keta* (Walbaum), горбуши *O. gorbuscha* (Walbaum), симы *O. masou* (Brevoort) и кунджи *Salvelinus leucomaenis* (Pallas). Пики заражения этим червем приходятся на летне-осенний период, сезон нерестового хода дальневосточных лососей, что в общем-то характерно и для инвазирования людей возбудителем анизакидоза, совпадающего по времени с нерестом кеты в Приморье [22, 23]. Какая морская рыба была источником заражения людей *D. orcini*, установить не удалось.

Судя по анамнезам заболеваний, причиной минимум 4 случаев дифиллоботриоза было питание корюшкой (в одном случае – сушеной, купленной на рынке, в остальных – самостоятельно выловленных). Эти рыбы (в Приморье плероцеркоиды лентецов были найдены у азиатской корюшки *Osmerus mordax* Mitchill, японской малоротой корюшки *Hypomesus nipponensis* McAllister и морской малоротой корюшки *H. japonicus* (Brevoort)) являются вторыми промежуточными хозяевами *Diphyllobothrium hottai* Yuzuki, Fukumoto et Abe, 1988. Кроме того, в 16% случаев это заболевание вызвано употреблением в пищу самостоятельно приготовленной красной икры («пятиминутки»), где в основном поселяются личинки *D. dendriticum* (Nitzsch, 1924) (плероцеркоиды *D. nihonkaiense* «предпочитают» скелетные мышцы в районе между жировым плавником и началом хвостового стебля рыб). Предположительно, и этот вид может быть одним из возбудителей дифиллоботриоза людей в Приморье (Попов и др., 2022).

Симптомы дифиллоботриоза сходны вне зависимости от вида возбудителя и протекают чаще субклинически. Могут наблюдаться тошнота, боли в животе, снижение аппетита, рвота, неустойчивый стул, иногда – кожные высыпания. При длительном течении характерна анемия.

Начиная с 1995 г. в Приморье зарегистрировано более 400 случаев дифиллоботриоза, причем в основном они были связаны с употреблением в пищу морских рыб (почти всегда самостоятельно пойманных или купленных на рынках парны́х). Основные случаи заражения приходились на города и поселки побережья Японского моря [21].

Мы не исключаем нахождение у людей в Приморье именно широкого лентеца, *D. latum*, но жизненный цикл его здесь не осуществляется, поэтому край не входит в зону заражения этим паразитом, и все такие инвазии должны считаться завозными. Собственно, возросшие миграционные потоки могут привести к обнаружению у людей в разных регионах инвазий, для них, этих регионов, нехарактерных, что неоднократно описывалось в литературе.

На юге Сахалина у сивуча *Eumetopias jubatus* (Schreber) и кольчатой нерпы *Pusa hispida* Schreber был отмечен еще один вид дифиллоботриид, который может факультативно инвазировать человека, – *Pyramicocephalus phocarum* (Fabricius, 1780). Промежуточными хозяевами этой цестоды являются морские рыбы. В пределах Приморского края этот гельминт у людей не регистрировался [5].

Дегельминтизация дифиллоботриоза осуществляется празиквантелом однократно в дозе 25 мг/кг.

Приморский край является частью ареала еще нескольких видов цестод, которых можно считать потенциально опасными для людей (их находили у человека вне пределов юга Дальнего Востока [24]). К таковым из представителей сем. Ligulidae Claus, 1885 относятся *Ligula intestinalis* (Linné, 1758) и *Schistocephalus solidus (*Bloch, 1872). Промежуточными хозяевами для этих видов служат пресноводные рыбы, а окончательными в норме – рыбоядные птицы. Для этих видов человек является случайным хозяином.

Также факультативным хозяином человек может считаться для *Dipylidium caninum* (Linné, 1758) (сем. Dipylidiidae (Linné, 1758)) (обычные окончательные хозяева – хищные млекопитающие, промежуточные – власоглавы), представителей семейств Mesocestoididae (Goeze, 1782) – *Mesocestoides lineatus* (Goeze, 1782) (нормальные окончательные хозяева – млекопитающие разных отрядов, преимущественно хищники и грызуны) и Anoplocephalidae (Cholodkowsky, 1902) – *Moniezia expansa* (Rudolphi, 1805) (обычные окончательные хозяева – парнокопытные млекопитающие, промежуточные – орибатидные клещи).

Комплекс профилактических и противоэпидемических мероприятий при тениидозах включает выявление и лечение больных, благоустройство населенных пунктов, обеспечение надзора за содержанием и убоем животных, а также ветеринарный контроль мяса. Существенное значение в профилактике дифиллоботриоза имеет тщательная кулинарная обработка рыбы и икры. Обеззараживание дальневосточных лососей от личинок лентецов достигается при определенных режимах замораживания. В профилактике гименолепидоза большое значение имеет привитие гигиенических навыков детям, плановая проверка детей в организованных коллективах, ежеквартальное обследование работников сферы питания. Важное значение в профилактике придается санитарно-просветительной работе среди всех слоев населения.

Заключение

Таким образом, из 18 опасных для человека ленточных червей, чей цикл может осуществляться в Приморском крае, у людей найдены возбудители 5 цестодозов – гименолепидоза (*Hymenolepis nana*), тениаринхоза (*Taeniarhynchus saginatus*), тениоза (*Taenia solium*), эхинококкоза (*Echinococcus granulosus*) и дифиллоботриоза

(*Diphyllobothrium nihonkaiense*, *D. orcini*, скорее всего еще *D. hottai* и, вероятно, *D. dendriticum*). Наиболее часто в Приморье регистрируется дифиллоботриоз.

Официальные показатели заражения людей как цестодами, так и прочими гельминтами не являются окончательными и дают лишь сравнительную характеристику (соотношение зараженности тем или иным гельминтом). С учетом тех людей, которые не обращались за медицинской помощью, эти цифры скорее всего на порядок выше.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ермоленко А.В., Попов А.Ф., Загней Е.В., Хомичук Т.Ф., Захарова Г.А., Нестерова Ю.В. Возбудители гельминтозов людей в Приморском крае // Вестн. ДВО РАН. 2020. № 1. С. 97–114.

2. Скрябин К.И., Матевосян Е.М. Гименолепидиды млекопитающих // Тр. ГЕЛАН. 1948. Т. 1. С. 15–92.

3. Гинецинская Т.А., Добровольский А.А. Частная паразитология. Т. 2. Паразитические черви, Моллюски и Членистоногие. М: Высш. шк., 1978. 292 с.

4. Лернер П.М. Записки эпидемиолога. Израиль, 2010. 140 с.

5. Ермоленко А.В., Мельникова Ю.А., Беспрозванных В.В., Надточий Е.В. Паразиты животных и человека юга Дальнего Востока. Ч. 3. Цестоды и скребни. Владивосток: Дальнаука, 2013. 154 с.

6. Мамаев Ю.Л., Охотина М.В. Гельминты уссурийского крота (*Mogera robusta* Nehring, 1891) // Гельминты Дальнего Востока и Тихого океана. 1968. С. 90–97. (Сообщ. ДВФ им. В.Л. Комарова СО АН СССР; вып. 26).

7. Крысиный цепень. https://aworms.ru/gelminty/o-glistah/krysinyj-cepen/

8. Ионина Н.С. Строение яиц карликового цепня и структуры его оболочек // Тр. ин-та малярии и мед. паразитол. Минздрава Таджик. ССР. 1954. № 2. С. 67–80.

9. Паразитарные болезни человека (протозоозы и гельминтозы). 3-е изд. / под ред.: Сергиев В.П., Лобзин Ю.В., Козлов С.*С.* С.-Пб.: Фолиант, 2016. 640 с.

10. Спасская С.С. Цестоды птиц СССР. Гименолепидиды. М.: Наука, 1966. 698 с.

11. Давыдова И.В. Гельминтозы, регистрируемые на территории Российской Федерации: эпидемиологическая ситуация, особенности биологии паразитов, патогенез, клиника, диагностика, этиотропная терапия // Consilium Medicum. 2017. Вып. 19, № 8. С. 32–40.

12. Чуелов С.Б., Россина А.А. Цистицеркоз человека, вызываемый *Taenia solium, Taenia crassiceps, Taenia hydatigena, Taenia martis* // Детские инфекции. 2022. Т. 21, № 2. С. 46–50.

13. Контримавичус В.Л. Гельминтофауна куньих Дальнего Востока // Тр. ГЕЛАН. 1963. Т. 13. С. 26–47.

14. Антипин Д.Н., Ершов В.С., Золотарев Н.В., Саляев В.А. Паразитология и инвазионные болезни сельскохозяйственных животных. М.: Сельхозгиз, 1959. 492 с.

15. Попов А.Ф., Суханова Г.И., Невзорова В.А. Паразитарные поражения легких // Респираторная медицина. Т. 2. М.: ГЭОТАР, 2017. С. 157–163.

16. Мусаев Г.Х., Фатьянова А.С., Левкин В.В. Принципы и современные тенденции лечения эхинококкоза печени // Хирургия. 2017. № 12. С. 90–94.

17. Rosenzvit M.C, Canova S.G., Kamenetzky L., Guarnera E.A. *Echinococcus granulosus*: intraspecific genetic variation assessed by a DNA repetitive element // Parasitology. 2001. Vol. 123, iss. 4. P. 381–388.

18. Smyth J.D., Smyth M.M. Natural and experimental hosts of *Echinococcus granulosus* and *E. multilocularis*, with comments on the genetics of speciation in the genus *Echinococcus* // Parasitology. 1964 Vol. 54, iss. 3. P. 493–514.

19. Надточий Е.В. Фауна гельминтов грызунов Дальнего Востока // Паразитологические и зоологические исследования на Дальнем Востоке. Уч. зап. ДВГУ. 1970. Вып. 16. С. 62–80.

20. Štěrba J., Baruš V. First record of *Strobilocercus fasciolaris* (Taeniidae – larvae) in man // Folia parasitol. 1976. Vol. 23, iss. 3. P. 221–226.

21. Попов А.Ф., Ермоленко А.В., Шедько М.Б., Загней Е.*В*. Дифиллоботриоз людей в Приморском крае: возбудители, эпидемиология, клиника // Мед. паразитология и паразитарные болезни. 2022. № 3. С. 24–32.

22. Царенко С.С., Кравцова В.О., Рожкова Т.В. Три случая анизакидоза желудка у милиционеров г. Владивостока // Новые технологии в эндоскопической диагностике и лечении: материалы 1-й Дальневост. окружной науч.-практ. конф. Владивосток, 2005. С. 75–77.

23. Добряков Е.Ю., Ермоленко А.В. К вопросу о распространении анизакидоза в Приморском крае // Мед. паразитология и паразитарные болезни. 2008. № 4. С. 11–14.

24. Coombs I. Helminth species recovered from humans In: Crompton D.W.T, Savioli L, editors. Handbook of helminthiasis for public health. Rosa Raton, Fl: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006. P. 12–24.

REFERENCES

1. Ermolenko A.V., Popov A.F., Zagney E.V., Khomichuk T.F., Zakharova G.A, Nesterova Yu.V. Vozbuditeli gel'mintozov lyudey v Primorskom krae = [Helminths of humans in Primorsky Region]. *Vestnik of the FEB RAS.* 2020;(1):97–114. (In Russ.). DOI: 10.25808/08697698.2020.209.1.011.

2. Skrjabin K.I., Matevosjan E.M. Gimenolepididy mlekopitayushchich = [Hymenolepidids of mammals]. *Trudy GELAN*. 1948;1:15–92. (In Russ.).

3. Ginetsinskaja T.A., Dobrovolsky A.A. Chastnaya parazitologiya. T. 2. Paraziticheskie chervi, mollyuski i chlenistonogie = [Special Parasitology. Vol. 2. Parasitic worms, molluscs and arthropods]. Moskow: Vyschaya schcola; 1978. 292 p. (In Russ.).

4. Lerner P.M. Zapiski epidemiologa = [Notes of epidemiologist]. Israel; 2010. 140 p. (In Russ.).

5. Ermolenko A.V., Melnikova Ju.A., Besprozvannykh V.V., Nadtochy E.V. Parazity zhivotnych i chelovaka v Primorskom krae. Chast 3. Tsestody i skrebni = [Parasites of animal and man in the southern Far East. Part 3. Cestoda and Acanthocephala]. Vladivostok: Dalnauka; 2013. 154 p. (In Russ.).

6. Mamaev Ju.L., Okhotina M.V. Gel'minty ussuriiskogo krota (*Mogera robusta* Nehring, 1891) = [Helminths of Ussuri mole (*Mogera robusta* Nehring, 1891)]. In: *Soobshchenija Dal'nevostochnogo filiala imeni V.L. Komarova Sibirskogo otdeleniya Akademii Nauk SSSR. Vol. 26. Helminthy Dalnego Vostoka i Tichogo okeana.* 1968. P. 90–97. (In Russ.).

7. Krysinyi tsepen'. (In Russ.). https://aworms.ru/gelminty/o-glistah/krysinyj-cepen/

8. Ionina N.S. Stroyenie yaits karlikovogo tsepnya i struktura ego obolochek = [The structure of the eggs of the dwarf tapeworm and the structure of its shells]. *Trudy Instituta malyarii i meditsinskoi parazitologii Minzdrava Tadzikskoi SSR.* 1954;(2):67–80. (In Russ.).

9. Sergiev V.P., Lobzin Ju.V., Sokolov V.S. (eds.). Parazytarnye bolezni cheloveka (protozoozy i gel'mintozy. 3-ye izd.) = [Human parasitic diseases (protozoa and helminthosis). 3rd ed.] S.-Pb.: Foliant; 2016. 640 p. (In Russ.).

10. Spasskaya S.S. Tsestody ptitz SSSR. Gymenolepididy = [Bird cestodes in the USSR. Hymenolepididae]. M.: Nauka; 1966. 698 p. (In Russ.).

11. Davydova I.V. Gel'mintozy, registriruemye na territorii Rossiiskoi Federatsii: epidemiologicheskaya situatsiya, osobennosti biologii parazitov, patogenez, klinika, diagnostika, etiotropnaya terapiya = [Helminthoses, registered in the territory of Russian Federation: epidemiological situation, biological features of parasites, pathogenesis, clinic, diagnosis, etiotropic therapy]. *Consilium Medicum*. 2017;19(8):32–40. (In Russ.). DOI: 10.26442/2075–1753_19.8.32–40.

12. Chuelov S.B., Rossina A.A. Tsistitserkoz cheloveka, vyzyvaemyi *Taenia solium, Taenia crassiceps, Taenia hydatigena, Taenia martis* = [Human Cysticercosis caused by *Taenia solium, Taenia crassiceps, Taenia hydatigena, Taenia martis*]. *Detskiye infektsii*. 2022;21(2):46–50. (In Russ.).

13. Kontrimavichus V.L. Gel'mintofauna kun'ikh Dal'nego Vostoka = [Helminth fauna of mustelids in the Far East]. *Trudy GELAN*. 1963;13:26–47. (In Russ.).

14. Antipin D.N., Erschov V.S., Zolotarev N.V., Salyaev V.A. Parazitologiya i invazionnye bolezni selskohozyastvennyh zhivotyh = [Parasitology and invasive diseases of farm animals]. M.: Selhozgiz; 1959. 492 p. (In Russ.).

15. Popov A.F., Suhanova G.I., Nevzorova V.A. Parazitarnye porazheniya legkih = [Parasitic lesions of the lungs]. In: *Respiratornaja medicina*. Vol. 2. Moscow: GEOTAR, 2017. P. 157–163. (In Russ.).

16. Musaev G. Ch., Fat'yanova A.S., Levkin V.V. Printsipy i sovremennye tendentsii lecheniya echinokokkoza pecheni = [Principles and modern trends in liver echinococcosis treatment] // *Khirurgiya.* 2017;(12):90–94. (In Russ.).

17. Rosenzvit M.C, Canova S.G., Kamenetzky L., Guarnera E.A. *Echinococcus granulosus*: intraspecific genetic variation assessed by a DNA repetitive elemant. *Parasitology.* 2001;123(4):381–388.

18. Smyth J.D., Smyth M.M. Natural and experimental hosts of *Echinococcus granulosus* and *E. multilocularis*, with comments on the genetics of speciation in the genus *Echinococcus*. *Parasitology*. 1964;54(3):493–514.

19. Nadtochy E.V. Fauna gel'mintov gryzunov Dal'nego Vostoka = [Fauna of helminths of rodents in the Far East].*// Parasitologitcheskie i zoologitcheskie issledovaniyja na Dalnem Vostoke. Uchenye zapiski DVGU*. 2017;16:62–80. (In Russ.).

20. Štěrba J., Baruš V. First record of *Strobilocercus fasciolaris* (Taeniidae – larvae) in man. *Folia parasitol*. 1976;23(3):221–226.

21. Popov A.F., Ermolenko A.V., Shedko M.B., Zagney E.V. Difillobotrioz lyudei v Primorskom krae: vozbuditeli, epidemiologiya, klinika = [Diphyllobothriosis of people in Primorsky Krai: pathogens, epidemiology, clinic]. *Medicinskaya parasitologiya and parasitarnye bolezni.* 2022;(3):24–32. (In Russ.).

22. Tsarenko S.S., Kravtsova V.O., Rozhkova N.V. Tri sluchaya anizakidoza zheludka u militsionerov g. Vladivostoka = [Three cases of gastric anisakiasis among polismen in Vladivostok]. In: *Novye technologii v endoskopicheskoi diagnostike i lechenii: materialy I Dalnevostochnoi okruznoi nauchno-praticheskoi konferentsii.* Valdivostok; 2005. P. 75–77. (In Russ.).

23. Dobrjakov E. Yu., Ermolenko A.V. K voprosu o rasprostranenii anizakidoza v Primorskom krae = [On the issue of the spread of anisakiasis in the Primorsky Region]. *Medicinskaya parasitologiya and parasitarnye bolezni*. 2008;(4):11–14. (In Russ.).

24. Coombs I. Helminth species recovered from humans. In: *Crompton D.W.T, Savioli L. (eds.). Handbook of helminthiasis for public health.* Rosa Raton, Fl: CRC Press, Taylor & Francis Group; 2006. P. 12–24.

Научная статья
УДК 576.89:574.3
DOI: 10.31857/S0869769824020132
EDN: lcocmx

Паразиты: некоторые аспекты стратегии выживания

А.В. Ермоленко✉, Д.М. Атопкин

Алексей Васильевич Ермоленко
кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН,
Владивосток, Россия
ermolenko_alexey@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-6316-7831

Дмитрий Матвеевич Атопкин
кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник
ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН,
Владивосток, Россия
atop82@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-8417-3424

Аннотация. В силу особенностей онтогенеза паразитов и специфичной для них среды обитания (другие живые организмы) обычные для свободноживущих форм способы поддержания стабильности и процветания популяций (увеличение численности особей и увеличение плодовитости вкупе с расширением ареалов), как правило, оказываются частично или полностью непригодными, поэтому паразиты используют иные пути, часть из которых рассматривается в настоящей работе.

Ключевые слова: емкость среды, паразиты, стратегия выживания

Для цитирования: Ермоленко А.В., Атопкин Д.М. Паразиты: некоторые аспекты стратегии выживания // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 2. С. 145–158.
http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020132, EDN: lcocmx

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы гос. задания РАН № 121031000154-4.

Original article

Parasites: some aspects of survival strategy

A.V. Ermolenko, D.M. Atopkin

Alexey V. Ermolenko
Candidate of Sciences in Biology, Senior Researcher
Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia
ermolenko_alexey@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-6316-7831

Dmitry M. Atopkin
Candidate of Sciences in Biology, Leader Researcher
Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia
atop82@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-8417-3424

Abstract. Due of the features of ontogeny of parasites and their specific habitat (other living organisms) the usual methods for free-living forms of maintaining the stability and prosperity – increasing number of specimen and increasing fecundity, coupled the expansion of the areas – usually turn out to be partially or completely unsuitable. To overcome this impasse, parasites use other ways, some of which are considered in this article.

Keywords: the carrying capacity, parasites, survival strategy

***For citation*:** Ermolenko A. V., Atopkin D. M. Parasites: some aspects of survival strategy. *Vestnik of the FEB RAS.* 2024;(2):145–158. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020132, EDN: lcocmx

Funding. The work was carried out within the framework of the state theme RAS assigment No 121031000154-4.

Введение

Численность популяции любого вида ограничена так называемой «емкостью среды». Это максимальный размер популяции, сообщества, биоценоза, который среда может стабильно поддерживать без негативного воздействия на данный вид и (или) среду обитания [1].

Основным способом поддержания демографической стабильности и процветания конкретного вида, находящегося на фазе биологического прогресса, является увеличение численности особей в популяции и, соответственно, общей плодовитости. Это неизбежно сопровождается расширением ареала за счет освоения новых территорий. Для свободноживущих организмов, освоивших гидросферу, литосферу и наземно-воздушную среду, это вполне обычное явление, в то время как у паразитических организмов имеются существенные отличия в способах поддержания стабильности популяции.

Очевидно, что чем выше численность вида, тем больше шансов для его выживания. Однако, в отличие от свободноживущих жизненных форм, емкость среды для паразитов резко ограничена. Высокая их численность в одной особи хозяина приводит к заболеванию и гибели последнего, что почти всегда ведет и к гибели паразита, уничтожившего единственно возможную для него среду обитания. Случаев, когда паразиту «выгодно» убить хозяина для продолжения своего жизненного цикла, немного, и отмечаются они лишь на стадиях развития в промежуточных хозяевах. Чаще всего в естественных экосистемах численность популяций почти всех видов паразитов не превышает критическую величину (сверх которой начинаются заболевания хозяев). Это своего рода тупик, который паразиты пытаются преодолевать похожими, но отличными от свободноживущих организмов способами.

Не претендуя на полноту изложения, мы рассмотрим здесь некоторые из таких способов.

Результаты и обсуждение

Паразиты – существа, освоившие довольно агрессивную для них среду обитания – организменную. Жизнь организма-хозяина ограничена во времени, в то время как паразитическому организму необходимо продолжать реализацию своего жизненного цикла. Для этого паразиту необходимо выработать приспособления для проникновения в иных хозяев, т.е. осуществить переход через внешнюю среду. «Детская смертность» при этом огромна, что требует увеличения яйцепродукции и числа личинок на различных стадиях развития. Так, если число откладываемых свободноживущими турбелляриями яиц в течение жизни измеряется сотнями [2], то для печеночного сосальщика *Fasciola hepatica* (Linné, 1758) это количество по разным оценкам составляет уже от нескольких сотен тысяч за жизнь [3] до миллиона за неделю [4], а для ленточных червей суточная плодовитость может измеряться миллионами яиц [5]. При этом весь жизненный цикл, от яйца до взрослой особи, замыкают в лучшем случае один-два потомка. Иными словами, реализуется R-стратегия одной из форм естественного отбора – увеличение числа потомства при высокой смертности на начальных этапах онтогенеза [6].

Паразиты у окончательных хозяев часто фиксируются необратимо, т.е. не могут перемещаться в пределах органа, в котором они обитают. Самооплодотворение у гермафродитов обычно блокируется в силу особенностей их анатомии или физиологии (разновременное созревание мужских и женских гамет). В такой ситуации может наблюдаться эффект скучивания (crowding effect) – поселение паразитов одного вида в пределах досягаемости друг друга. Подобное явление мы наблюдали у моногеней *Ancylodiscoides parasiluri* Yamaguti, 1937 – паразитов амурского сома *Parasilurus asotus* (Linné). На жабрах сомов эти довольно крупные (до 6 мм) черви локализуются группами (до нескольких десятков в каждой из них) [7]. Помимо облегчения оплодотворения, такое расположение моногеней приводит к повреждению лишь отдельных жаберных лепестков, тогда как жабры в целом не теряют способности к нормальному функционированию. Равным образом на жабрах и стенках ротовой полости рыб рода *Thymallus* Linck поселяются моногенеи *Tetraonchus borealis* (Olsson, 1893) [8], а в кишечниках лососевых рыб – скребни *Echinorhynchus cryophilus* (Sokolowskaja, 1962).

Отражение «стремления» к снижению «детской смертности» проявляется и в совпадении таксисов мирацидиев – личинок партеногенетического поколения трематод – с биологическими особенностями моллюсков-хозяев, позволяющих им скапливаться в местах максимальной плотности поселения последних [9, 10].

В строении и поведении церкарий – подвижных личинок гермафродитного поколения трематод также отмечаются многочисленные адаптации к заражению последующих хозяев. Это проявляется в неравномерности выхода церкарий многих видов трематод из моллюсков в течение суток. Наибольшие пики эмиссии отмечаются в часы активности вторых промежуточных хозяев. Отсутствие такой периодичности может свидетельствовать либо об отсутствии у второго промежуточного хозяина каких-то выраженных периодов покоя и активности, либо о том, что первый и второй промежуточный хозяин у конкретного вида трематод один и тот же.

Количество «рождающихся» церкарий прямо связано с местом обитания моллюсков. Например, трематоды, развивающиеся с участием речных гастропод рода *Parajuga* Prozorova et Starobogatov, продуцируют на несколько порядков больше церкарий, чем те, чей жизненный цикл связан с лимнофильными первыми промежуточными хозяевами [11].

Вышедшие из моллюсков церкарии под влиянием рео-, гео- и фототаксисов перемещаются в зону максимального скопления вторых промежуточных хозяев [10].

Морфология церкарий является прямым отражением их приспособления для более успешного заражения вторых промежуточных хозяев. Например, инвазирующие в основном донных десятиногих ракообразных (крабов, речных раков) церкарии почти лишены хвоста и не имеют возможности к активному плаванию в толще воды [12], также как и церкарии трематод рода *Nanophyetus* (Chapin, 1926), которые инвазируют в основном лососеобразных рыб, не способны к активному плаванию, а медленно перемещаются по дну. В данном случае утрата плавучести связана, скорее всего, с высокими скоростями течения горных и полугорных рек, где в основном и обитают лососи. Свободно плавающие церкарии могли бы быть снесены течением воды за пределы биотопов этих рыб.

Интересно, что «выбор» в качестве основных промежуточных хозяев лососеобразных рыб, живущих в холодных участках рек, привел к тому, что максимальные пики эмиссии из моллюсков и максимальная продолжительность жизни церкарий (для *Nanophyetus schikhobalowi* Skrjabin et Podjapolskaja, 1931 – до 1,5 мес.) отмечаются при температуре воды около 6 °С [13, 14]. Примерно при такой температуре воды наблюдается начало миграции пресноводных лососей (ленков и тайменя) и хариусов по рекам Приморского края: весной вверх по течению, осенью – вниз, в более глубокие непромерзающие зимой участки водоемов.

Для многих видов трематод разной систематической принадлежности характерно либо укрупнение церкарий, либо сцепление большей их части хвостами друг с другом в группы типа «Rattenkönig» [10, 15]. В обоих случаях это делает их более заметными для вторых промежуточных хозяев, а во втором – еще и обеспечивает более интенсивное заражение ими. Массовое заражение вторых промежуточных хозяев таким способом происходит у трематоды *Dicrocoelium dendriticum* (Rudolphi, 1819) при инфицировании муравьев. Дочерние спороцисты – партеногенетические формы трематод с развившимися внутри них церкариями – выходят из первых промежуточных хозяев (разных видов наземных моллюсков) в виде окутанных слизью шаров. Эти шары попадают во внешнюю среду и проглатываются муравьями [16, 17]. В некоторых случаях даже выходящие из моллюсков (наземных гастропод сем. Bradybenidae Pilsbry) одиночные спороцисты с церкариями трематоды *Eurytrema pancreaticum* (Janson, 1899) также обеспечивают массовое заражение их вторых промежуточных хозяев (прямокрылых насекомых) [18].

Для пассивного заражения окончательных хозяев посредством проглатывании спор миксоспоридии (паразиты преимущественно костных рыб) выработали ряд морфологических и биологических адаптаций, способствующих попаданию спор паразита в организм определенного вида-хозяина. Некоторые виды миксоспоридий имеют специальные приспособления к парению спор в толще воды, что позволяет им концентрироваться на той глубине, где обитает их хозяин, другие их не имеют и быстро оседают на дно. Последние заражают в основном донных рыб. В целом способность спор к парению возрастает с уменьшением их массы и увеличением объема, дополнительными средствами служат различные выросты, кили, ребрышки. Поэтому крупные шарообразные споры без отростков быстро опускаются на дно, а мелкие споры сложной формы парят в толще воды [19].

Появление массовых скоплений рыб во время нереста, нагула или зимовки в немалой степени определяется температурой воды. Именно в эти периоды и происходит массовое спорообразование у миксоспоридий, что тоже связано с изменением температуры воды [20, 21].

Паразиты могут изменять поведение промежуточного хозяина, облегчая его поедание окончательным. Из попавших в муравья личинок трематод *Dicrocoelium dendriticum* одна-две сформировавшиеся в нем метацеркарии – бесхвостые гермафродитные личинки, локализуются около мозгового ганглия, вызывая каталептический зажим при температурах 15–20 °C и ниже. Этот зажим может парализовать муравья на макушках трав, где пасущиеся жвачные проглатывают их вместе с травой [16, 17].

Как говорилось выше, очень редко **паразитам выгодно убить своего хозяина для продолжения своего жизненного цикла.** Обычно в качестве примера приводятся цестоды-лигулиды. Поселяясь в полости тела рыб, плероцеркоиды – одна из личиночных стадий этих червей – растут до тех пор, пока не разорвут стенки полости тела и не приведут к смерти хозяина-рыбы. При этом рыба всплывает к поверхности водоема, где заглатывается окончательными хозяевами – рыбоядными птицами [22].

Облигатно тетраксенный цикл характерен для трематоды *Isoparorchis hypselobagri* (Billet, 1898). Первыми промежуточными хозяевами ее являются брюхоногие моллюски рода *Parajuga*, вторыми – амфиподы и личинки поденок, третьими – различные не сомовые рыбы, окончательными – сомы [23]. Личинки питаются тканями внутренних органов третьих промежуточных хозяев (рыб), рано или поздно вызывая их гибель. Сами паразиты при этом гибнут не сразу, а примерно через неделю. Если учесть, что не отличающиеся высокой скоростью передвижения сомы могут питаться мертвыми рыбами, то можно утверждать, что гибель зараженных рыб повышает шансы на выживание трематод.

По нашим наблюдениям, в обоих случаях (как с изопарорхисом, так и с лигулидами) поведение промежуточных хозяев (рыб) непосредственно перед гибелью резко меняется. Они уходят с течения и из глубины, прибиваясь к мелководьям в затишные участки водоемов. При этом на внешние раздражители такие рыбы практически не реагируют.

Одной из важных характеристик для паразитов является локализация – обитание в определенном органе (ткани) или органах. В этом случае максимальная безопасная для хозяина численность не может быть превышена из-за угрозы смерти хозяина. Однако иногда паразиты могут менять свое местообитание в одном и том же организме хозяина, что обеспечивает увеличение численности паразита с сохранением жизнеспособности хозяина.

Обычно моногенеи отряда Dactylogyridea Bychowsky, 1937 обитают на жабрах рыб. Неоднократно была отмечена локализация половозрелых особей вида *Tetraonchus borealus*, паразитов лососеобразных рыб рода *Thymallus*, на жаберных крышках, а не на жабрах [8, 24]. Повреждения для рыбы-хозяина при этом минимальны, а число потомства увеличивается за счет увеличения числа особей.

Возможна смена локализации при освоении разных стадий развития хозяина. Так, паразиты сазана *Trichodina nigra* Lom, 1960*, Dactylogyrus extensus* Mueller et Van Cleave, 1932*, D. minitus* Kulwiec, 1927 в основном паразитируют на жабрах. Как показали наши исследования, заражение рыб этими паразитами происходит в первую неделю жизни. Жабры в этом возрасте очень маленькие, не соизмеримые с размером даже триходин. Однако эти паразиты все равно заражают личинок сазана, но локализуются не на жабрах, а на поверхности тела хозяев. При этом моногенеи достигают половозрелости.

При превышении определенной численности особей предшествующей стадии развития паразита возможна смена предпочитаемых мест обитания.

Метацеркарии трематод вида *Nanophyetus schikhobalowi* Skrjabin et Podjapolskaja, 1931, в норме являющиеся паразитами лососеобразных рыб, поселяются у них в почках и мышцах, преимущественно занимая белые скелетные мышцы поясов конечностей – место минимального иммунного ответа, где чаще всего в первую очередь и локализуются прочие паразиты мышц. В случае превышения некоего уровня численности эти метацеркарии обнаруживаются под чешуей и кожей, причем там их может быть даже больше, чем в местах обычной локализации.

Трематоды рода *Paragonimus* Dollfus, 1939 на стадии мариты чаще всего локализуются в легких различных млекопитающих. Одним из окончательных хозяев для *P. heterotremus* Chen et Hsia, 1964 являются крысы. Легкие этих животных относительно небольшие, поэтому большая часть трематод у них достигает половозрелости в печени. Откладываемые червями яйца при этом во внешнюю среду не выходят и могут попасть туда только после смерти зараженной крысы [25].

Неоднократно у трематод разной систематической принадлежности описан прогенез – достижение половозрелости в промежуточных хозяевах. Большинство таких наблюдений связано с наступлением ранней половой зрелости метацеркарий. Однако зарегистрировано два случая прогенеза у личинок в третьем промежуточном хозяине.

Среди полутора сотен видов рода *Paragonimus* уникальным развитием характеризуется *P. westermanni ishunensis* Chung Hsu et Kao, 1978. Обычно жизненный цикл представителей этой группы включает смену двух промежуточных (переднежаберные моллюски и десятиногие ракообразные) и окончательного (млекопитающие) хозяев. Однако у *P. westermanni ishunensis* цикл несколько усложняется. Первыми промежуточными хозяевами его являются пресноводные речные моллюски рода *Parajuga*, вторыми – раки рода *Cambaroides* Faxon. Если зараженного рака съедает хищное млекопитающее, то метацеркарии мигрируют в легкие и там достигают половой зрелости. Если же рак стал жертвой травоядного или всеядного млекопитающего (крысы, кабана, мыши, человека), то в нем формируется так называемая мышечная личинка, становящаяся инвазионной для нормального окончательного хозяина через 42 сут. При этом личинки трематод, не образуя цист, мигрируют по различным органам третьего промежуточного хозяина. Некоторые из них проникают в легкие этих животных, где могут достичь половой зрелости [26].

Как сказано выше, заражение трематодой *Isoparorchis hypselobagri* третьих промежуточных хозяев (не сомовых рыб) однозначно приводит к их гибели. Однако если третий промежуточный хозяин достаточно крупный, эти личинки успевают достичь половой зрелости [23]. Как и в случае с *Paragonimus heterotremus* из печени крыс, продуцируемые червями яйца попадают во внешнюю среду только после смерти третьего хозяина.

Помимо смены места локализации в типичном хозяине, иногда возможно включение в онтогенез паразитов иных хозяев. Происходит это по разным причинам.

В 1961 г. Чан [27] описал случай гиперпаразитизма триходин *Trichodina nigra* на поверхности тела моногеней *Silurodiscoides asoti* (Yamaguti, 1937) от амурского сома и *Ancyrocephalus mogurndae* (Yamaguti, 1940) от аухи *Siniperca chuatsi* (Basilewsky). Этих же инфузорий находили на *Tetraonchus monenteron* (Wegener, 1857) от амурской щуки *Esox reicherti* Dybowski [28]. Нами на поверхности тела моногеней *Ancylodiscoides parasiluri* также от амурского сома были отмечены инфузории *Trichodina acuta* Lom, 1961, *T. nigra* и *Apiosoma* sp. Перечисленные моногенеи во всех случаях были относительно крупными (*A. parasiluri* – до 6 мм), что позволяло триходинам и апиозомам на них закрепляться.

Возможны переходы к новому хозяину при наличии типичных окончательных хозяев в случае большой численности паразитов. Этому может способствовать сходная диета хозяев. Так, скребни вида *Echinorhynchus cryophilus* чаще всего обнаруживаются у лососеобразных рыб: тупорылого ленка *Brachymystax tumensis* Mori, тайменей *Hucho taimen* (Pallas) и *Parahucho perryi* (Brevoort), молоди симы *Oncorhynchus masou* (Brevoort), мальмы *Salvelinus malma* (Walbaum), кунджи *S. leucomaenis* (Pallas), амурского сига *Coregonus ussuriensis* Berg и хариусов *Thymallus* spp. [29–31]. В пределах ареала этих рыб скребни отмечаются еще у амурского чебака *Leuciscus waleckii* (Dybowski) [29], сибирского гольца *Barbatula toni* (Dybowski)

[32], гольяна Лаговского *Rhynchocypris lagowskii* (Dybowski) [31]. Источником заражения рыб являются инвазированные личинками данного паразита амфиподы, составляющие часть диеты указанных хозяев.

Для цестоды *Nippotaenia mogurndae* Yamaguti et Mijata, 1940 основным окончательным хозяином в условиях российского Дальнего Востока является ротан-головешка *Perccottus glenii* Dybowski – рыба, широко распространенная в стоячих и слабопроточных водоемах. Промежуточным хозяином этого червя являются копеподы [33], которыми питаются многие виды рыб. Ротаны, особенно младших возрастных групп, заражены данной цестодой почти на 100%. Мы находили половозрелых *N. mogurndae* в кишечнике маньчжурского озерного гольяна *Rhynchocypris perenurus mantschuricus* (Berg). Гольяны были пойманы в небольшом пруду, где, кроме них, из рыб обитали еще ротаны и серебряные караси *Carassius gibelio* (Bloch).

При сходной диете возможно приживание паразитов, вообще не свойственных данной систематической группе хозяев. Так, И.А. Круглик выращивала трематод рыбоядных птиц в цыплятах, содержащихся на рыбной диете [34, 35].

Трематоды рода *Metagonimus* Katsurada, 1913 на взрослой стадии паразитируют у птиц и млекопитающих, питающихся рыбой. Последние служат вторыми промежуточными хозяевами этих трематод. Мы отмечали ювенильных особей *Metagonimus pusillus* Tatonova, Shumenko et Besprozvannykh, 2018 в кишечнике амурского сома из р. Раздольная (юг Приморья) [7]. Могли ли трематоды прожить у рыб до взрослого состояния, установить не удалось.

Не только сходным питанием объясняются следующие находки. На юге Приморья находится солоноватое оз. Лебединое. Это неглубокий (около 1 м), хорошо прогреваемый лагунный водоем с небольшой соленостью. В кишечниках обитающих там змееголовов мы неоднократно обнаруживали половозрелых цестод *Schistocephalus solidus* (Müller, 1776), являющихся паразитами рыбоядных птиц [36]. Все эти находки приходились на август, когда температура воды в озере достигала 27–29°C. Очевидно, этот фактор в сочетании с ихтиофагией (сходным химизмом кишечника змееголова и рыбоядных птиц) обусловил возможность достижения паразитом половой зрелости.

Трематода *Azygia hwangtsiyui* Tsin, 1933 имеет триксенный жизненный цикл. Первым промежуточным хозяином ее является моллюск *Cipangopaludina ussuriensis* (Gerstfeldt), вторыми – ротаны и молодь змееголова *Channa argus warpachowskii* (Berg). Обычными окончательными хозяевами паразита являются змееголовы. Однако если ротан, который с возрастом переходит к преимущественному хищничеству, не исключающему и каннибализм, съест зараженную метацеркариями *A. hwangtsiyui* рыбу, то у него вырастает половозрелая трематода. То, что ротан является вторичным дефинитивным хозяином, явствует из того, что взрослые азигии у него вырастают меньшего размера, для достижения половозрелости им требуется больше времени, чем если бы они развивались у змееголова, а матка содержит меньшее количество яиц [37]. Жизненный цикл *A. hwangtsiyui* с участием ротанов как дефинитивных хозяев может протекать как в пределах ареала змееголова, так и в тех водоемах, где змееголова нет [38]. В последнем случае – это единственная для паразита возможность выживания в таком водоеме.

В 1971 г. С.М. Коновалов [39] обнаружил на молоди щуки *Esox lucius* Linné из р. Пенжина (Камчатский край) два вида моногеней – *Gyrodactylus cernuae* Malmberg, 1957 и *G. decorus* Malmberg, 1956. Для щуки эти виды как представители основной паразитофауны не характерны (ранее не отмечались). Первый паразит обитает на ерше *Acerina cernua* (Linné) и речном окуне *Perca fluviatilis* Linné, а второй – на красноперой плотве *Scardinius erythrophthalmus* (Linné), уклейке *Alburnus alburnus* (Linné) и обыкновенной плотве *Rutilus rutilus* (Linné). Все эти 5 видов рыб в настоящее время в Пенжине отсутствуют, но, как указывает Коновалов со ссылкой на ряд источников, ранее обитали в Сибири и на Чукотке, возможно, что и в этой реке. После их исчезновения паразиты сумели выжить, перейдя на нового хозяина.

Подобный переход моногенеи на нового хозяина в отсутствие основного наблюдался и нами. В р. Кедровая (юг Приморского края) ленки рода *Brachymystax* Günther в настоящее время не обитают. Однако один из приуроченных к ним видов моногеней, *Tetraonchus pseudolenoki* Strelkov, 1962, перешел к паразитированию на молодь симы *Oncorhynchus masou* [30].

Как сказано выше, трематоды *Nanophyetus schikhobalowi* на стадии метацеркарии поселяются преимущественно в тканях лососеобразных рыб. В некоторых притоках р. Раздольная (юг Приморья) – Казачке, Комаровке – эти рыбы практически исчезли. Однако паразит там сохранился, начав использовать в качестве второго промежуточного хозяина гольянов *Rhynchocypris lagowskii* (Dybowski). При этом метацеркарии сменили место локализации, поселяясь в основном в мышцах головы и в глазах. Они встречаются и в месте «типичной» локализации, но в очень небольших количествах.

Адаптации паразитов, направленные на поддержание своей численности, являются в первую очередь отражением воздействия на них различных факторов среды как абиотических (свет, температура и пр.), так и биотических (особенностей питания, физиологии, экологии хозяев, взаимоотношений между паразитами). Почти во всех случаях на развитие таких адаптаций оказывает влияние комплекс факторов, из которых один или несколько могут быть ведущими.

Температура окружающей среды для организмов-хозяев сказывается, например, на интенсивности яйцепродукции паразитов, инфицирующих данных хозяев. Так, у заражающих в основном лососеобразных рыб трематод *Crepidostomum farionis* (Müller, 1780) в зимние месяцы (при температуре воды в реках 0,1°С) количество отрождаемых маритами яиц стремится к нулю. Любопытно, что яйцепродукция у марит трематод сем. Paramphistomidae Fischoeder, 1901 в условиях Приморского края по нашим данным также практически прекращается (матки червей, извлеченных из вскрытых зимой коров и оленей, пустые, а семенники и яичники уменьшаются в размерах почти вдвое), тогда как в условиях северного Вьетнама у тех же видов лишь несколько снижается в период с декабря по февраль. Копытные, как и все млекопитающие, – теплокровные животные с постоянной температурой тела. Факт сезонного снижения плодовитости у их паразитов, очевидно, связан еще и с какими-то иными факторами. В обоих случаях это направлено на уменьшение затрат энергии, необходимой червям для производства половых продуктов. В холодные месяцы года моллюски – первые промежуточные хозяева упомянутых паразитов (соответственно двустворки родов *Sphaerium* Scopoli и *Pisidium* Pfeiffer и гастроподы-планорбиды) зарываются в грунт водоемов, что исключает возможность их заражения мирацидиями трематод.

Напротив, у человеческой аскариды *Ascaris lumbricoides* Linné самки откладывают яйца (которые могут переживать как низкие, так и высокие температуры) вне зависимости от времени года. Во всяком случае, матки извлеченных в разные месяцы из людей половозрелых самок аскарид всегда были заполнены яйцами.

Температура сказывается и на сроках развития гермафродитного поколения трематод в моллюсках, интенсивности эмиссии и сроках жизни церкарий во внешней среде, что неоднократно указывалось разными авторами.

В диапазоне температур от 3 до 27 °С размножение паразитических инфузорий *Ichthyophthirius multifiliis* Fouquet, 1876 в норме происходит путем инцистирования во внешней среде с последующей палинтомией и образованием бродяжек [40–43 и др.]. Вне этих пределов расселительная стадия паразита (бродяжки) нежизнеспособна. В.В. Панасенко [44] описал своеобразный способ размножения *I. multifiliis*, имеющий место при температуре менее 3°С, – посредством инцистирования и деления трофонтов в поверхностных тканях рыб. Нами подобное размножение этих инфузорий зарегистрировано при температуре воды 28–29°C [45]. Такие нарушения в жизненном цикле *I. multifiliis* безусловно являются реакцией на экстремальные температуры и отражают «стремление» к выживанию паразита в этих условиях.

Предпочтение разными промежуточными хозяевами разных участков водоемов с различной освещенностью отражается в выработке мирацидиями и церкариями определенной **реакции на свет** [10].

Скорость течения воды находит свое отражение как в морфологии, так и в количестве церкарий, выделяемых моллюсками.

Следует отметить, что не все мирацидии и церкарии группируются в зоне обитания первого или второго промежуточного хозяев. Часть из них держится в стороне от общей группы. Это дает шансы на инвазирование каких-то иных животных и повышает таким образом шансы на продолжение жизненного цикла. Собственно, именно для повышения шансов на выживание не все церкарии тех видов трематод, которые в норме цепляются друг за друга хвостами, делают это. Некоторые из них все время своей жизни плавают поодиночке [15].

Повышение численности и соответственно шансов на выживание обеспечивается **сменой мест локализации у специфичных хозяев либо расширением круга хозяев**. Для инфузорий класса Peritricha Stein, 1859 широкий круг хозяев обычно является нормой. По образу жизни эти простейшие должны считаться в основном эктокомменсалами, использующими других животных в качестве субстрата. Лишь при повреждении покровов хозяина (при массовом поселении или по иным причинам) они начинают частично питаться выделяемой в этих участках слизью и тканями [46].

Естественно, ни сидячие (апиозомы), ни подвижные (триходиниды) инфузории, входящие в этот класс, не могут заражать и не заражают абсолютно любое водное животное, но круг хозяев у них обычно очень широкий. Узкая специфичность для этих простейших скорее является исключением из правила.

Переход на иного хозяина может быть облегчен его коэкологичностью с основным: одним местообитанием и (для эндопаразитов) сходной диетой. Но и здесь такие переходы происходят далеко не всегда.

Горные и полугорные реки Приморского края являются частью ареала двух видов лососевых рыб рода *Brachymystax* Günther – тупорылого *B. tumensis* Mori и острорылого *B. lenok* (Pallas) ленков. Часто они встречаются вместе в одном и том же водотоке. Диета этих рыб очень сходна, отличается лишь процентным соотношением тех или иных групп животных. В частности, оба вида питаются амфиподами, являющимися промежуточными хозяевами скребня *Echinorhynchus cryophilus* и нематоды *Salvelinema salmonicola* (Ishii, 1916). При этом острорылый ленок почти на 100% заражен *S. salmonicola*, а *E. cryophilus* у него не встречается. Напротив, у тупорылого ленка скребень встречается довольно часто, а нематод он практически лишен. Только один раз мы нашли 2 экз. *S. salmonicola* у *B. lenok*, пойманного в реке, где второй вид этого рода рыб отсутствовал [47]. Последняя находка может служить отражением того факта, что переход паразита к иному хозяину чаще происходит при отсутствии или немногочисленности основного (а также при его высокой численности).

На численности паразитов могут сказываться и взаимоотношения между ними, причем не только конкурентные. Нами был отмечен случай, сходный с симбиозом, между паразитами амурского сома – моногенеями *Ancylodiscoides parasiluri* и миксоспоридиями *Myxobolus gigi* (Fujita, 1927). Поселяясь на жабрах амурского сома группами, моногенеи разрывают жаберные капилляры своими крючьями. В этих местах застревают плазмодии миксоспоридий. Отмечена прямая связь между количеством моногеней в группе и количеством цист миксоспоридий в местах их прикрепления [48].

Заключение

Не все стратегии выживания паразитов проиллюстрированы приведенными в настоящей статье примерами. Перечисленные здесь особенности паразитических организмов, включая отклонения в поведении их личиночных стадий, нарушения типичной локализации, развитие способности к существованию в несвойственных хозяевах (нарушения специфичности), могут иметь, с одной стороны, исключительно адаптивную природу, а с другой – фиксироваться как следствие изменений и отклонений на генетическом уровне. Не исключено, что оба предполагаемых процесса взаимосвязаны друг с другом. Частое проявление какой-либо адаптивной стратегии выживания вполне может привести к ее эволюционному закреплению и генетическому детерминированию. Однако вероятность фиксации результата во время реализации той или иной стратегии выживания на данный момент определить сложно в силу длительных временных периодов, необходимых для закрепления адаптивных свойств и процессов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Корляков К.А. Емкость среды. Челябинск: Изд-во Челяб. ун-та, 2018. 385 с.
2. Мурина В.В. Биология некоторых видов псаммофильных турбеллярий Черного моря // Вестн. зоологии. 1984. № 2. С. 80–81.
3. Thomas A.P. The life history of the liver-fluke (*Fasciola hepatica*) // Quart. Microscop. Sci. 1883. Vol. s2–23, N89. P. 99–133.
4. Скрябин К.И. Надсемейство Fascioloidea Stiles et Goldberger, 1910 // Скрябин К.И. Трематоды животных и человека. Основы трематодологии. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1948. Т. 2. С. 7–330.
5. Догель В.А. Зоология беспозвоночных. 8-е изд. М.: ЛЕНАНД. 2015. 628 с.
6. Яблоков А.В., Юсуфов А.Г. Эволюционное учение. М.: Высш. шк., 1981. 343 с.
7. Ермоленко А.В. Паразиты рыб пресноводных водоемов континентальной части бассейна Японского моря. Владивосток: ДВО РАН, 1992. 237 с.
8. Шедько М.Б., Шедько С.В., Ермоленко А.В. Об «атипичной» локализации *Tetraonchus borealis* (Olsson, 1893) (Monogenea: Tetraonchidae) на рыбах рода *Thymallus* // Тр. Центра паразитологии. 2018. Т. 50. Биоразнообразие паразитов. С. 281–283.
9. Гинецинская Т.А. Трематоды, их жизненные циклы, биология и эволюция. Л.: Наука, 1968. 411 с.
10. Галактионов К.В., Добровольский А.А. Происхождение и эволюция жизненных циклов трематод. С.-Пб.: Наука, 1998. 404 с.
11. Беспрозванных В.В. Фауна, биология, экология партенит и церкарий трематод моллюсков рода *Juga* (Pachychilidae) из рек Приморского края. Владивосток: Дальнаука, 2000. 121 с.
12. Blair D., Xu Z.-B., Agatsuma T. Paragonimiasis and the genus *Paragonimus* // Advances in Parasitology. 1999. Vol. 42. P. 113–222.
13. Филимонова Л.В. Обнаружение новых промежуточного и дополнительного хозяев трематоды *Nanophyetus schikhobalowi* // Тр. Гельминт. лаб. АН СССР. 1964. Т. 14. С. 246–251.
14. Филимонова Л.В. Возбудитель нанофиетоза человека и животных в СССР и его биология: автореф. дис. … канд. биол. наук. М., 1967. 17 с.
15. Беспрозванных В.В. Биология трематоды *Echinochasmus milvi* в условиях юга Дальнего Востока СССР // Паразитология. 1989. Т. 23, вып. 3. С. 237–243.
16. Manga-Gonzalez M.Y., Gonzalez-Lanza C., Cabanas E., Campo R. Contributions to and review of dicrocoeliosis, with special reference to intermediate hosts of *Dicrocoelium dendriticum* // Parasitology. 2001. Vol. 123, iss. 7. P. 91–114.
17. Otranto D., Traversa D. Dicrocoeliosis in ruminants: a little known fluke disease // Trends in Parasitology. 2003. Vol. 19, iss. 1. P. 12–15.
18. Панин В.Я. Трематоды дикроцелииды мировой фауны. Алма-Ата: Наука, 1984. 248 с.
19. Шульман С.С. Миксоспоридии фауны СССР. М.; Л.: Наука, 1966. 508 с.
20. Aseeva N.L., Zuenko Yu.I. Year-to year changes of terms of Myxosporidia breeding in dependence on thermal conditions in Peter the Great Bay // Abstracts of Workshop «Global change studies in the Far East», September 11–15, 2000. Vladivostok, 2000. P. 7–8.
21. Aseeva N.L., Zuenko Yu.I. Year-to year changes of terms of Myxosporidia breeding depending on temperature conditions in Peter the Great Bay (Sea of Japan) // Reports of the workshop on the global change studies in the Far East. Vladivostok, 2003. P. 225–230.
22. Дубинина М.Н. Ремнецы (Cestoda: Ligulidae) фауны СССР. М.; Л.: Наука, 1966. 261 с.

23. Беспрозванных В.В., Ермоленко А.В. Жизненный цикл *Isoparorchis hypselobagri* (Billet, 1898) (Trematoda: Isoparorchidae) – паразита сомовых рыб // Зоол. журн. 1989. Т. 68, № 1. С. 136–139.

24. Буторина Т.Е., Дячук Т.А. Паразиты восточносибирского хариуса *Thymallus arcticus pallasi* реки Унгра (Южная Якутия) // Школа по теоретической и морской паразитологии: тез. докл. VII Всерос. конф. с междунар. участием, 9–14 сентября 2019 г. Севастополь, 2019. С. 90.

25. Voronova A.V., Besprozvannykh V.V., Ngo H.D., Plekhova N.G., Hung N.M., Tatonova Yu.V. *Paragonimus heterotremus* Chen et Hsia, 1964 (Digenea: Paragonimidae): species identification based on the biological and genetic criteria, and pathology of infection // Parasitology Research. 2020. Vol. 119, iss. 12. P. 4073–4088.

26. Беспрозванных В.В. Биология *Paragonimus westermani ishunensis* в условиях Приморского края. Экспериментальные исследования // Медицинская паразитология и паразитарные болезни. 1994. № 4. С. 28–32.

27. Чан Сын Ман. К систематике рода *Trichodina* // Паразитол. сб. ЗИН АН СССР. 1961. Т. 20. С. 360–375.

28. Виниченко Л.Н., Заика В.Е., Тимофеев В.А., Штейн Г.А., Шульман С.С. Паразитические простейшие рыб бассейна Амура // Паразитол. сб. ЗИН АН СССР. 1971. Т. 25. С. 10–40.

29. Соколовская И.Л. Скребни рыб бассейна Амура // Паразитол. сб. ЗИН АН СССР. 1971. Т. 25. С. 165–176.

30. Ермоленко А.В., Беспрозванных В.В., Шедько С.В. Фауна паразитов лососевых рыб (Salmonidae, Salmoniformes) Приморского края. Владивосток: Дальнаука, 1998. 89 с.

31. Ермоленко А.В., Мельникова Ю.А., Беспрозванных В.В., Надточий Е.В. Паразиты животных и человека юга Дальнего Востока. Ч. 3. Цестоды и скребни. Владивосток: Дальнаука, 2013. 154 с.

32. Ермоленко А.В. Фауна паразитов вьюновых рыб (сем. Cobitidae) водоемов Приморского края // Паразитология. 2004. Т. 38, вып. 1. С. 53–67.

33. Демшин Н.И. Постэмбриональное развитие цестоды *Nippotaenia mogurndae* (Nippotaeniidea, Nippotaeniidae) // Паразитология. 1985. Т. 19, вып. 1. С. 39–43.

34. Круглик И.А. О видовой идентификации метацеркарий рода *Tetracotyle* de Fillipi, 1854 // Паразитологические исследования. Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. С. 105–107.

35. Круглик И.А. Цикл развития *Cotylurus japonicus* Ishii, 1932 (Trematoda, Strigeidae) // Паразиты животных и растений. Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. С. 74–76.

36. Ермоленко А.В., Беспрозванных В.В. Фауна паразитов змееголова (*Channa argus warpachowskii*) Приморского края // Паразитология. 2008. Т. 42, вып. 4. С. 325–329.

37. Беспрозванных В.В. Жизненные циклы трематод *Azygia hwangtsiytii* и *A. robusta* (Azygiidae) в условиях Приморского края // Паразитология. 2005. Т. 39, вып. 4. С. 278–284.

38. Вайнутис К.С., Воронова А.Н. Исследование гельминтофауны реки Болотная и пойменного озера близ поселка Соловей-Ключ (Надеждинский район, Приморский край) // Вестн. ДВО РАН. 2021. № 1. С. 94–101.

39. Коновалов С.М. Дифференциация локальных стад нерки *Oncorhynchus nerka* (Walbaum). Л.: Наука, 1971. 234 с.

40. Бауер О.Н. Ихтиофтириус в прудовых хозяйствах и меры борьбы с ним // Изв. ВНИОРХ. 1955. Т. 36. С. 184–223.

41. Бауер О.Н. Экология паразитов пресноводных рыб (Взаимоотношения паразита со средой обитания) // Изв. ГосНИОРХ. 1959. Т. 49. С. 5–206.

42. Щупаков И.Г. Новые данные по биологии и экологии ихтиофтириуса (*Ichthyophthirius multifiliis*) // Докл. АН СССР. 1952. Т. 83, № 5. С. 773–776.

43. Щупаков И.Г. Новые данные по биологии и экологии ихтиофтириуса (*Ichthyophthirius multifiliis*) и их значение в борьбе с этим паразитом рыб // Тр. пробл. и темат. совещ. ЗИН АН СССР. 1954. Вып. 4. С. 70–74.

44. Панасенко В.В. К вопросу биологии ихтиофтириуса // IX конф. Украин. паразитол. о-ва: тез. докл., ч. 3. Киев: Наук. думка, 1980. С. 136.

45. Ермоленко А.В. О размножении *Ichthyophthirius multifiliis* Fouquet, 1876 (Ciliata, Ophryoglenidae) // Паразитология. 1985. Т. 19, вып. 6. С. 470–471.

46. Шульман С.С., Янковский А.В. Тип Ресничные – Ciliophora // Определитель паразитов пресноводных рыб фауны СССР. Л.: Наука, 1984. Т. 1. Паразитические простейшие. С. 252–280.

47. Шедько С.В., Ермоленко А.В., Беспрозванных В.В. О разделении местообитаний тупорылого и острорылого ленков (Salmonidae, *Brachymystax*) в реке Арму (бассейн реки Уссури) // Зоол. журн. 1997. Т. 76, № 5. С. 637–640.

48. Ермоленко А.В., Холин С.К. О характере сосуществования паразитов пресноводных рыб // Современные проблемы паразитологии, зоологии и экологии. Материалы I и II междунар. чтений, посвященных памяти и 85-летию со дня рождения С.С. Шульмана (март 2002 г. и февраль 2003 г., Калининград). Калининград: Изд-во КГТУ, 2004. С. 210–218.

REFERENCES

1. Korljakov K.A. Yemkost' sredy = [The carrying capacity]. Chelyabinsk: Chelyabinsk Univ.; 2018. 385 p. (In Russ.).

2. Murina V.V. Biologiya nekotoryh vidov psammofil'nyh turbelliarii Chernogo moray = [Biology of certain psammophilous Turbellaria in the Black Sea]. *Vestnik zoologii*. 1984;(2):80–81. (In Russ.).

3. Thomas A.P. The life history of the liver-fluke (*Fasciola hepatica*) // Quart. Microscop. Sci. 1883. Vol. s2–23, N89. P. 99–133.

4. Skrjabin K.I. Nadsemeystvo Fascioloidea Stiles et Goldberger, 1910 = [Superfamily Fascioloidea Stiles et Goldberger, 1910]. In: *Skrjabin K.I. Trematody zhyvotnuch i cheloveka. Osnovy trematodologii.* Moscow, Leningrad: AN SSSR; 1948. Vol. 2. P. 7–330. (In Russ.).

5. Dogel V.A. Zoologiya bespozvonochnyh = [Invertebrate zoology]. 8th ed. Moscow: LENAND; 2015. 628 p. (In Russ.).

6. Yablokov A.V., Yusufov A.G. Evoluytsionnoe uchenie = [Evolutionary doctrine]. Moscow: Vysshaya shkola; 1981. 343 p. (In Russ.).

7. Ermolenko A.V. Parazity ryb presnovodnyh vodoemov kontinental'noi chasti basseina Yaponskogo morya = [Parasites of freshwater fish of continental part of Japan Sea basin]. Vladivostok: DVO RAN; 1992. 237 p. (In Russ.).

8. Shedko M.B., Shedko S.V., Ermolenko A.V. Ob "atypichnoi" lokalizatsii *Tetraonchus borealis* (Olsson, 1893) (Monogenea: Tetraonchidae) na rybach roda *Thymallus* = [About atypical localization of *Tetraonchus borealis* (Olsson, 1893) (Monogenea: Tetraonchidae) in fish genus *Thymallus*]. *Bioraznoobrazije parasitov (Trudy Tsentra Parasitologii)*. 2018;50:281–283. (In Russ.).

9. Ginetsinskaya T.A. Trematody, ih zhiznennye tsikly, biologiya i evolutsiya = [Trematodes, their life cycles, biology and evolution]. Leningrad: Nauka; 1968. 411 p. (In Russ.).

10. Galaktionov K.V., Dobrovolsky A.A. Proiskhozhdeniye i evolutsiya zhiznennykh tsiklov trematod = [The origin and evolution of Trematode life cycles]. Saint Petersburg: Nauka; 1998. 404 p. (In Russ.).

11. Besprozvannykh V.V. Fauna, biologiya i ecologiya partenit i tserkarii trematod mollyusskov roda *Juga* (Pachychilidae) iz rek Primorskogo kraya = [Fauna, biology and ecology of trematode parthenatae and cercariae from mollusks genus *Juga* (Pachychilidae) from rivers of Primorsky Region]. Vladivostok: Dalnauka; 2000. 121 p. (In Russ.).

12. Blair D., Xu Z.-B., Agatsuma T. Paragonimiasis and the genus *Paragonimus*. *Advances in Parasitology*. 1999;42:113–222.

13. Filimonova L.V. Obnaruzheniye novykh promezhutochnogo i dopolnitel'nogo khozyaev trematody *Nanophyetus schikhobalowi* = [The discovery of new intermediate and additional hosts of the trematode *Nanophyetus schikhobalowi*]. *Trudy GELAN*. 1964;14:246–251. (In Russ.).

14. Filimonova L.V. Vozbuditel' nanofiyetoza cheloveka i zhivotnykh v SSSR i yego biologiya = [The causative agent of human and animal nanophyetosis in the USSR and its biology]. Ph D. dissertation abstract. Moscow; 1967. 17 p. (In Russ.).

15. Besprozvannykh V.V. Biologiya trematody *Echinochasmus milvi* v usloviyah yuga Dal'nego Vostoka SSSR = [Biology of the trematode *Echinochasmus milvi* in conditions of the southern Far East of USSR]. *Parasitologiya*. 1989;23(3):237–243. (In Russ.).

16. Manga-Gonzalez M.Y., Gonzalez-Lanza C., Cabanas E., Campo R. Contributions to and review of dicrocoeliosis, with special reference to intermediate hosts of *Dicrocoelium dendriticum*. *Parasitology*. 2001;123(7):91–114.

17. Otranto D., Traversa D. Dicrocoeliosis in ruminants: a little known fluke disease. Trends in Parasitology. 2003;19(1):12–15.

18. Panin V. Ya. Trematody dicrotseliidy mirovoi fauny = [Dicrocoeliid trematodes of world fauna]. Alma-Ata: Nauka; 1984. 248 p. (In Russ.).

19. Schulman S.S. Miksosporidii fauny SSSR = [Myxosporidian fauna of the USSR]. Moscow, Leningrad: Nauka; 1966. 508 p. (In Russ.).

20. Aseeva N.L., Zuenko Y.I. Year-to year changes of terms of Myxosporidia breeding in dependence on thermal conditions in Peter the Great Bay. In: *Abstracts of Workshop «Global change studies in the Far East». September 11–15, 2000*. Vladivostok; 2000. P. 7–8.

21. Aseeva N.L., Zuenko Yu.I. Year-to year changes of terms of Myxosporidia breeding depending on temperature conditions in Peter the Great Bay (Sea of Japan). In: *Reports of the workshop on the global change studies in the Far East*. Vladivostok; 2003. P. 225–230.

22. Dubinina M.N. Remnetsy (Cestoda: Ligulidae) fauny SSSR = [Tapeworms (Cestoda: Ligulidae) of the fauna of the USSR]. Moscow, Leningrad: Nauka; 1966. 261 p. (In Russ.).

23. Besprozvannykh V.V., Ermolenko A.V. Zhiznennyi tsikl *Isoparorchis hypselobagri* (Billet, 1898) (Trematoda: Isoparorchidae) – parazita somovyh ryb = [Life cycle of *Isoparorchis hypselobagri* (Billet, 1898) (Trematoda: Isoparorchidae), parasite of silurid fishes]. *Zool. J.* 1989;68(1):136–139. (In Russ.).

24. Butorina T.E., Dyachuk T.A. Parazity vostochosibirskogo hariusa *Thymallus arcticus pallasi* reki Ungra (Yuzhnaya Yakutiya) = [Parasites of the East Siberian grayling *Thymallus arcticus pallasi* of the Ungra River (South Yakutia)]. In: *Shkola po teoreticheskoi i morskoi parazitologii. VII Vseross. konf. s mezhdunarodnym uchastiem. tez. dokladov. Sevastopol', 9–14 Sent., 2019*. Sevastopol; 2019. P. 90. (In Russ.).

25. Voronova A.V., Besprozvannykh V.V., Ngo H.D., Plekhova N.G., Hung N.M., Tatonova Yu.V. *Paragonimus heterotremus* Chen et Hsia, 1964 (Digenea: Paragonimidae): species identification based on the biological and genetic criteria, and pathology of infection. *Parasitology Research*. 2020;119(12):4073–4088.

26. Besprozvannykh V.V. Biologiya *Paragonimus westermani ishunensis* v usloviyah Primorskogo kraya. Eksperimental'nye issledovaniya = [Biology of *Paragonimus westermani ishunensis* in conditions of Primorsky Region. Experimental studies]. *Meditsinskaya parasitologiya i parasitarnye bolezni*. 1994;(4):28–32. (In Russ.).

27. Chan Syn Man. K sistematike roda *Trichodina* = [To the taxonomy of the genus *Trichodina*]. *Parasitologytsheskii sbornik Zoologcheskogo instituta AN SSSR*. 1961;20:360–375. (In Russ.).

28. Vinichenko L.N., Zaika V.E., Timofeev V.A., Shtein G.A., Schulman S.S. Paraziticheskie protseishie ryb basseina Amura = [Parasitic Protozoa of fishes of the Amur river basin]. *Parasitologytsheskii sbornik Zoologcheskogo instituta AN SSSR*. 1971;25:10–40. (In Russ.).

29. Sokolowskaya I.L. Skrebni ryb basseina Amura = [Acanthocehala of fishes of the Amur river basin]. *Parasitologytsheskii sbornik Zoologcheskogo instituta AN SSSR*. 1971;25:165–176. (In Russ.).

30. Ermolenko A.V., Besprozvannykh V.V., Shedko S.V. Fauna parazitov lososevyh ryb (Salmobidae, Salmoniformes) Primorskogo kraya = [Parasite fauna of salmonid fishes (Salmobidae, Salmoniformes) of Primorsky Region]. Vladivostok: Dalnauka; 1998. 89 p. (In Russ.).

31. Ermolenko A.V., Melnikova Ju.A., Besprozvannykh V.V., Nadtochy E.V. Parazity zhivotnyh i chelovaka yuga Dal'nego Vostoka. Pt. 3. Tsestody i skrebni = [Parasites of animal and man in the southern Far East. Pt. 3. Cestoda and Acanthocephala]. Vladivostok: Dalnauka; 2013. 154 p. (In Russ.).

32. Ermolenko A.V. Fauna parazitov v'yunovyh ryb (sem. Cobitidae) vodoemov Primorskogo kraya = [Parasite fauna from loaches (Cobitidae) ofwater basins in the Primorsky Territory]. *Parasitologiya*. 2004;38(1):53–67. (In Russ.).

33. Demschin N.I. Postembrional'noe razvitie tsestody *Nippotaenia mogurndae* (Nippotaeniidea, Nippotaeniidae) = [Postembrional development of the cestode *Nippotaenia mogurndae* (Nippotaeniidea, Nippotaeniidae)]. *Parasitologiya*. 1985;19(1):39–43. (In Russ.).

34. Kruglik I.A. O vidovoi identifikatsii metatserkarii roda *Tetracotyle* de Fillipi, 1854 = [On specific identification of metacercariae of the genus *Tetracotyle* de Fillipi, 1854]. *Parasitologitcheskie issledovaniya*. Vladivostok: DVO AN SSSR; 1989. P. 105–107. (In Russ.).

35. Kruglik I.A. Tsikl razvitiya *Cotylurus japonicus* Ishii, 1932 (Trematoda, Strigeidae) = [Life cycle of *Cotylurus japonicus* Ishii, 1932 (Trematoda, Strigeidae)]. In: *Parasyty zhivotnyn i rastenii*. Vladivostok: DVO AN SSSR; 1989. P. 74–76. (In Russ.).

36. Ermolenko A.V., Besprozvannykh V.V. Fauna parazitov zmeegolova *Channa argus warpachowskii* Primorskogo kraya = [Parasite fauna of the snakehead *Channa argus warpachowskii* from Primorsky Krai]. *Parasitologiya*. 2008;42(4):325–329. (In Russ.).

37. Besprozvannykh V.V. Zhiznennye tsikly trematod *Azygia hwangtsiytii* i *A. robusta* (Azygiidae) v usloviyah Primorskogo kraya = [Life cycles of the trematode *Azygia hwangtsiytii* and *A. robusta* (Azygiidae) in Primorsky Territory]. *Parasitologiya*. 2005;39(4):278–284. (In Russ.).

38. Vainutis K.S., Voronova A.N. Issledovanie gel'mintofauny reki Bolotnaya i poimennogo ozera bliz poselka Solovey-Klyuch (Nadezhdinskii raion Primorskogo kraya = [Study of helminth fauna inthe BolotnayaRiver and floodplain ake near the Solovey-Klyuch village (Nadezhdinsky District, Primorsky Region)]. *Vestnik of the FEB RAS*. 2021;(1):94–101. (In Russ.).

39. Konovalov S.M. Differentsiatsiya lokal'nyh stad nerki *Oncorhynchus nerka* (Walbaum) = [Differentiation of local stocks of sockey salmon *Oncorhynchus nerka* (Walbaum)]. L.: Nauka; 1971. 234 p. (In Russ.).

40. Bauer O.N. Ihtioftirius v prudovyh hozyaistvah i mery bor'by s nim = [*Ichthyophthirius* in pond farms and measures to combat it]. *Isvestiya VNIORH*. 1955;36:184–223. (In Russ.).

41. Bauer O.N. Ekologiya parazitov presnovodnyh ryb (Vzaimootnosheniya parazitov so sredoi obitaniya) = [Ecology of parasites of freshwater fish (Relationship on the parasite and environment)]. *Isvestiya GosNIORH*. 1959;49:5–206. (In Russ.).

42. Shchupakov I.G. Novye dannyy po biologii i ekologii ihtioftiriusa (*Ichthyophthirius multifiliis*) = [New data on biology and ecology of *Ichthyophthirius multifiliis*]. *Doklady AN SSSR*. 1952;83(5):773–776. (In Russ.).

43. Shchupakov I.G. Novye dannye po biologii i ekologii iktioftiriusa (*Ichthyophthirius multifiliis*) i ih znachenie v bor'be s etim parazitom ryb = [New data on biology and ecology of *Ichthyophthirius multifiliis*

and its importance in the fight against this fish parasite]. *Trudy problemnyh I tematicheskih soveshchanii Zoologicheskogo Instituta AN SSSR*. 1954;4:70–74. (In Russ.).

44. Panasenko V.V. K voprosu biologii ihtioftiriusa = [To the question of the biology of *Ichthyophthirius*]. In: *IX konferentsiya ukrainskogo obshchestva parasitologov (Abstracts. Pt. 3)*. Kiev: Naukova dumka; 1980. P. 136. (In Russ.).

45. Ermolenko A.V. O razmozhenii *Ichthyophthirius multifiliis* Fouquet, 1876 (Ciliata, Ophryoglenidae) = [About reproduction of *Ichthyophthirius multifiliis* Fouquet, 1876 (Ciliata, Ophryoglenidae)]. *Parasitologiya*. 1985;19(6):470–471. (In Russ.).

46. Schulman S.S., Yankovsky A.V. Tip Resnichnye – Ciliophora = [Type Ciliated – Ciliophora]. In: *Opredelitel parasitov presnovodnyh ryb fauny SSSR*. Leningrad: Nauka; 1984. Vol. 1. Parasiticheskie prosteischie. P. 252–280. (In Russ.).

47. Shedko S.V., Ermolenko A.V., Besprozvannykh V.V. O razdelenii mestoobitanii tuporylogo i ostrorylogo lenkov (Salmonidae, *Brachymystax*) v reke Armu (bassein reki Ussuri) = [On the division of habitats of the blunt-snouted and sharp-snouted Asiatic trouts (Salmonidae, *Brachymystax*) in the Armu River (basin Ussuri River)]. *Zool. J*. 1997;76(5):637–640. (In Russ.).

48. Ermolenko A.V., Kholin S.K. O kharaktere sosushchestvovaniya parazitov presnovodnykh ryb=[On the nature of the coexistence of parasites in freshwater fish]. In: *Materialy I i II Mezhdunarodnyh chtenii, posvyashchennyh pamyati i 85-letiyu so dnya rozhdeniya S.S. Schulmana (March 2002 and Febriary 2003)*. Kaliningrad: KGTU; 2004. P. 210–218. (In Russ.).

Научная статья
УДК 631.4+631.46+631.8
DOI: 10.31857/S0869769824020149
EDN: lcmxvm

Влияние комплексной предпосевной обработки семян сои в Приморском крае на урожайность, микрофлору почв и процессы гумусонакопления

Л.Н. Пуртова✉, И.В. Киселева, Н.С. Кочева, Д.А. Русакова, А.Н. Емельянов

Людмила Николаевна Пуртова
доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник
Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, Россия
purtova@biosoil.ru
http://orcid.org/0000-0001-7776-7419

Ирина Владимировна Киселева
кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, Россия
Kiseleva-iv@inbox.ru
http://orcid.org/0000-0002-2547-5905

Нина Сергеевна Кочева
научный сотрудник
Федеральный научный центр агробиотехнологий Дальнего Востока им А.К. Чайки, пос. Тимирязевский, Уссурийск, Россия
lab.sem1@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-0028-8257

Дарья Александровна Русакова
аспирант, ведущий инженер
Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, Россия
dashka93.1993@mail.ru
https://orcid.org/0009-0005-6257-2068

Емельянов Алексей Николаевич
кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, директор
Федеральный научный центр агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, пос. Тимирязевский, Уссурийск, Россия
emelyanov.prim@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-7112-7856

Аннотация. Приведены результаты первого этапа исследования последействия совместного применения предпосевной обработки семян сои инсектофунгицидным препаратом (Стандак Топ) с инокулянтом (Хайкоут супер соя) и препаратом Гумат калия в условиях лесостепной зоны Приморского края на физико-химические показатели и микрофлору агротемногумусовых подбелов. Во всех исследуемых вариантах опыта с предпосевной обработкой семян сои установлено снижение содержания гумуса по сравнению с контролем, вызванное усилением процессов минерализации органического вещества микрофлорой и выноса питательных элементов с растительной массой. Зафиксировано возрастание ферментативной (каталазной) активности, что свидетельствовало об увеличении биологической активности почв в целом. Установлена тесная обратная корреляционная связь между содержанием гумуса и параметрами каталазной активности ($r = -0{,}86$). Для варианта 5 (Гумат калия + + Хайкоут супер соя) выявлены наиболее существенные изменения в составе микрофлоры почв по сравнению с контролем. В этом варианте отмечались значительные увеличения численности грибов, олигонитрофилов и рост биогенности почв в целом, что способствовало значительному усилению процесса трансформации органического вещества и деструкции азотистых соединений гумуса. Наибольшее количество клубеньков на корнях сои зафиксировано в фазу цветения и начала бобообразования в вариантах Стандак Топ + Гумат калия + + Хайкоут супер соя и Гумат калия + Хайкоут супер соя. Наиболее позитивное последействие на урожайность сои оказывало применение препаратов при предпосевной обработке семян гуматом калия и Стандак Топ. Отмечена положительная тенденция в прибавке урожая сои по сравнению с контролем в вариантах: гумат калия + Хайкоут супер соя и Стандак Топ + + Гумат калия + Хайкоут супер соя.

Ключевые слова: почва, гумус, микрофлора, соя, Стандакт топ, Гумат калия, Хайкоут супер соя, урожайность

Для цитирования: Пуртова Л.Н., Киселева И.В., Кочева Н.С., Русакова Д.А., Емельянов А.Н. Влияние комплексной предпосевной обработки семян сои в Приморском крае на урожайность, микрофлору почв и процессы гумусонакопления // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 2. С. 159–169. http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020149, EDN: lcmxvm

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121031000134-6, № FNGW-2022-005).

Original article

The effect of complex pre-sowing treatment of soybean seeds in Primorsky Krai on yield, soil microflora and humus accumulation processes

L.N. Purtova, I.V. Kiseleva, N.S. Kocheva, D.A. Rusakova, A.N. Emelyanov

Lyudmila N. Purtova
Doctor of Sciences in Biology, Leading Researcher
Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok, Russia
purtova@biosoil.ru
https://orcid. org / 0000-0001-7776-7419

Irina V. Kiseleva
Candidate of Sciences in Biology, Senior Researcher
Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok, Russia
Kiseleva-iv@inbox.ru
https://orcid.org / 0000-0002-2547-5905

Nina S. Kocheva
Researcher
Federal Scientific Center of Agrobiotechnology in the Far East named after A.K. Chaika, Timiryazevsky village, Russia
lab.sem1@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-0028-8257

Daria A. Rusakova
Postgraduate Student, Leading Engineer
Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok, Russia
dashka93.1993@mail.ru
https://orcid.org/0009-0005-6257-2068

Alexei N. Emelyanov
Candidate of Sciences in Agriculture, Senior Researcher, Director
Federal Scientific Center of Agrobiotechnology in the Far East named after A.K. Chaika, Timiryazevsky village, Russia
emelyanov.prim@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-7112-7856

Abstract. The results of the first stage of the study of the aftereffect of the combined use of the pre-sowing treatment of soybean seeds with an insectofungicidal preparation (Standac Top) with an inoculant (HiCoat Super Soy) and Potassium humate in the conditions of the forest-steppe zone of Primorsky Krai on the physico-chemical parameters and microflora of agrotemnohumus podbelov are presented. In all the studied variants of the experiment with pre-sowing treatment of soybean seeds, a decrease in the humus content was found, compared with the control, caused by an increase in the processes of mineralization of organic matter by microflora and an increase in the process of removal of nutrients from the plant mass. An increase in enzymatic (catalase) activity was recorded, which indicated an increase in the biological activity of soils as a whole. A close inverse correlation was established between the humus content and the parameters of catalase activity (r = – 0.86). For option 5 (Potassium humate + HiCoat Super Soy), the most significant changes in the composition of the soil microflora were revealed, compared with the control. In this variant, there was a significant increase in the number of fungi, oligonitrophils and soil biogenicity in general, which contributed to a significant increase in the process of transformation of organic matter and destruction of nitrogenous humus compounds. The greatest amount of nodule formation was recorded during the flowering phase and the beginning of bean formation on the variants of Standac Top + Potassium humate + HiCoat Super Soy. The most positive aftereffect on soybean yield was provided by the use of drugs during pre-sowing seed treatment with Potassium humate and Standact top and Potassium Humate + HiCoat Super Soy. There was a positive trend in the increase in soybean yield compared to the control on the variants: Potassium humate + HiCoat Super Soy and Standac Top + Potassium humate + HiCoat Super Soy.

Keywords: soil, hymus, microflora, soy, Standarc Top, Potassium humate, HiCoat Super Soy, yield

For citation: Purtova L.N., Kiseleva I.V., Kocheva N.S., Rusakova D.A., Emelyanov A.N. The effect of complex pre-sowing treatment of soybean seeds in Primorsky Krai on yield, soil microflora and humus accumulation processes. Vestnik of the FEB RAS. 2024;(2):159–169. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020149, EDN: lcmxvm

Funding. The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 121031000134-6, № FNGW-2022-005).

Введение

Соя, один из важных источников продовольственных и кормовых ресурсов, является фиксатором азота атмосферы. Возделывание сои в полевых севооборотах позволяет решать актуальные вопросы применения агротехники, связанные с повышением плодородия почв [1–3]. Вступая в симбиоз с бактериями рода *Bradyrhizobium*, растения получают необходимое количество азота в течение всего периода вегетации [4]. Чистый препарат клубеньковой бактерии *Bradyrhizobium japonicum* вызывает образование клубеньков на корневой системе сои, усиливающих фиксацию атмосферного азота, способствуя переводу его в усвояемую для культуры аммонийную форму. Способность к биологической фиксации азота у бобовых составляет от 50 до 200 кг/га в зависимости от культуры и условий среды [5, 6].

Для того чтобы при выращивании уменьшить потери сои от болезней и повысить урожай, семена сои обрабатывают инокулянтами (препаратами клубеньковых бактерий) и фунгицидами [7]. Исследованиями Н.А. Бушневой, проведенными в центральной природно-климатической зоне Краснодарского края, установлен положительный эффект совместного применения фунгицида и инокулянта Хайкоут супер при предпосевной обработке семян сои: увеличивалось как число клубеньков на корнях растений, так и их масса [8]. Современные фунгициды достаточно универсальны по своему действию на разные виды возбудителей. Фунгицидный препарат Стандак Топ является инновационным протравителем, применяемым для контроля основных болезней и вредителей сои. Ранее установлено положительное влияние обработки семян фунгицидом Стандак Топ на рост раннеспелого сорта сои Алмаз, где количество образованных растениями бобов в варианте с применением фунгицида положительно отличалось от контроля на 12% [9]. Таким образом, вопрос совместимости используемых фунгицидов с ризобиальными инокулянтами с целью разработки оптимальных технологий при выращивании сои является актуальным.

Наряду с инокулянтами и фунгицидами при обработке семян сои широкое применение находит препарат Гумат калия. Этот препарат является безопасным, повышающим энергию прорастания семян, стимулирующим ростовые процессы и способным за сравнительно короткий период времени восстанавливать плодородие почв, он широко применяется в сельскохозяйственном производстве [10, 11]. Положительное действие гуминовых кислот можно улучшить путем создания композиций с определенными микроэлементами, фунгицидами и микроорганизмами.

В Приморском крае в 2022 г. соей было засеяно 292 700 га, средняя урожайность составила 12–13 ц/га [12]. Для повышения урожайности сои необходимо комплексное применение препаратов, стимулирующих рост, энергию прорастания семян, а также обладающих инсектофунгицидным действием. Между тем вопрос совместного применения инсектофунгицидного препарата с инокулянтом и Гуматом калия при предпосевной обработке семян сои в условиях Приморского края не рассматривался. Не изучалось и последействие обработки семян сои на микрофлору почв и процессы гумусонакопления. Поэтому первой целью нашего исследования в данном направлении было установление влияния применения препаратов Хайкоут супер соя, Стандак Топ, Гумат калия и их комбинаций при предпосевной обработке семян сои на урожайность сои, микофлору и трансформацию органического вещества почв в условиях лесостепной зоны Приморского края.

Материалы и методы

Полевые опыты по изучению влияния предпосевной обработки сои препаратов протравителей и инокулянта на образование клубеньков проводили согласно методическим указаниям по регистрационным испытаниям фунгицидов в сельском хозяйстве [13]. Закладка опыта в трехкратной повторности с посевом сои сорта Бриз проводилась в питомнике размножения 1 года на пашне стационарного опыта ФНЦ Агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, пос. Тимирязевский, Уссурийского района Приморского края, согласно методике Б.А. Доспехова [14]. Норма высева – 500 тыс. всхожих семян на 1 га. Учетная площадка делянки 50 м^2. Отбор почвенных образцов проводили в сентябре 2022 г. методом конверта. Почва – агротемногумусовый подбел глееватый (в работе использованы названия почв согласно Классификации и диагностике почв России [15]) – характеризовалась следующим набором генетических горизонтов: PU (0–25 см) – Elnng (25–47) – BTg (47–102) – Cg (102 см и ниже). Содержание гумуса в пахотном слое изменялось в диапазоне от 4,58 до 5,15%, реакция почвенного раствора (pH сол.) – от 5,94 до 6,01. Почвы среднесуглинистого гранулометрического состава.

При подсевной обработке семян сои использованы следующие препараты:

1. Стандак Топ – фунгицидный протравитель, действующие вещества (г/л): пираклостробин (25), фипронил (250), тиофанат метил (225). Спектр действия: фузариоз всходов и фузариозная корневая гниль, аскохитолз, плесневение семян. Оказывает положительное влияние на всхожесть семян, хорошо совместим с инокулянтами. Применялся в дозе 1,5 л/т.

2. Хайкоут супер соя – инокулянт, чистый препарат клубеньковой бактерии *Bradyrhizobium japonicum.* Высокий бактериальный титр (10 млрд клеток в 1 мл препарата) одного штамма гарантирует качественную инокуляцию. Препарат совместим с протравителями, при предпосевной обработке семян сои применялся в дозе 2,84 л/т.

3. Основа Гумата калия – соль гуминовой кислоты, в состав входят также белки, аминокислоты, стимуляторы роста растений, микро- и макроэлементы. Гумат калия снижает кислотность почв, активизирует деятельность микрофлоры почв, стимулирует рост и повышает иммунитет растений к стресс-факторам, ускоряет созревание урожая, повышает его качество. Гуматы являются экологически чистыми веществами, которые не накапливаются в растениях, и безвредны для человека. Препарат применялся в дозе 1 л/т, основного действующего вещества (гуминовые кислоты) – 80 г/л.

Закладка опыта в посевах сои в условиях полевого опыта проводилась по схеме: 1) Контроль, 2) Стандак Топ, 3) Стандак Топ + Хайкоут супер соя, 4) Гумат калия, 5) Гумат калия + Хайкоут супер соя, 6) Стандак Топ + Гумат калия, 7) Стандак Топ + Гумат калия + Хайкоут супер соя, 8) Хайкоут супер соя. Номера опытов соответствуют используемым в таблицах.

При исследовании физико-химических параметров почв применяли общепринятые в почвоведении методы. Кислотность почв (рНв, рНс) исследовали потенциометрически с помощью комбинированного стеклянного электрода на рН-метре HI 2215 HANNA. Содержание гумуса в горизонте PU определяли по методу И.В. Тю-

Таблица 1

Метеорологические условия 2022 г.*

Показатель	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Температура воздуха, °С							
Средний за месяц	7,5	13,0	16,9	21,4	21,5	16,1	8,1
Средний многолетний	4,9	11,2	15,7	20,0	20,0	15,0	7,0
Осадки, мм							
Общий за месяц	18,2	56,5	117,7	214,0	214,0	108,8	63,1
Средний многолетний	35,0	63,0	84,0	93,0	93,0	106,0	54,0

* Данные агрометеорологической станции «Тимирязевский». URL: http://www.primgidromet.ru/about/karta_seti/timiryazevskiy (дата обращения: 18.10.2022).

рина [16]. При оценке содержания и запасов гумуса использованы оценочные шкалы, разработанные Д.С. Орловым с соавторами [17]. Изменения кислотности почв характеризовали по общепринятым региональным шкалам [18]. Каталазную активность исследовали газометрическим методом по А.Ш. Галстяну [19].

Численность микроорганизмов различных эколого-трофических групп определяли классическим методом посева почвенной суспензии на агаризованные питательные среды: мясо-пептонный агар (МПА), крахмало-аммиачный агар (КАА), среды Эшби и Чапека [20].

Погодные условия формирования почв представлены в табл. 1.

Полученные результаты обработаны статистически с помощью компьютерной программы Microsoft Office Excel 2013. В таблицах приведены средние статистические данные и ошибка среднего.

Результаты и обсуждения

Исследуемые почвы приурочены к Приморской юго-западной гидротермической провинции, для которой характерны высокие среднегодовые показатели выпадения осадков (до 800 мм), радиационного баланса (52,2 ккал/см^2 в год) и затрат энергии на почвообразование (44,9 ккал/см^2 в год) [21–22]. Неравномерное выпадение осадков в течение года вызывает сильное переувлажнение почв летом и иссушение в осенне-зимний период. За период вегетации 2022 г. сумма активных температур свыше 10 °С составила 2778 °С, сумма осадков – 657,8 мм (ГТК = 2,37 – избыточно-влажный). Количество осадков в июне, июле и августе превысило в 1,2–2,3 раза средние многолетние нормы (табл. 1).

Гумусообразование на исследуемых вариантах опыта, судя по показателям рНс, протекало в условиях слабокислой реакции среды (табл. 2). Показатели рНв актуальной кислотности были выше: во всех исследуемых вариантах опыта реакция среды слабощелочная.

Таблица 2

Параметры почвы в горизонте PU агротемногумусовых подбелов в зависимости от способа предпосевной обработки семян сои

Вариант опыта	рНв	рНс	Содержание гумуса, %	Запасы гумуса*, т/га
1	7,44 ± 0,07	6,07 ± 0,02	5,15 ± 0,25	131,8 ± 3,75
2	7,60 ± 0,10	6,09 ± 0,05	4,77 ± 0,19	130,7 ± 2,54
3	7,64 ± 0,15	6,10 ± 0,00	4,96 ± 0,20	124,0 ± 2,20
4	7,59 ± 0,13	6,08 ± 0,20	4,38 ± 0,05	109,5 ± 4,5
5	7,50 ± 0,11	6,02 ± 0,18	4,86 ± 0,15	128,3 ± 3,20
6	7,47 ± 0,09	6,01 ± 0,01	3,23 ± 0,10	87,2 ± 2,10
7	7,49 ± 0,10	5,97 ± 0,20	4,58 ± 0,08	116,3 ± 3,21
8	7,45 ± 0,12	5,95 ± 0,18	4,58 ± 0,09	110,8 ± 4,50

* В слое 0–20 см.

Содержание гумуса, согласно оценочным градациям Д.С. Орлова с соавторами [17], на контроле в посевах сои без протравливания семян было ниже средних значений, а запасы гумуса соответствовали средним показателям. То, что в контроле содержание гумуса стало выше, чем в вариантах опыта, объясняется меньшим выносом гумусовых соединений из-за меньшей вегетативной массы растений и урожайности сои (табл. 3).

Таблица 3

Урожайность сои и процент выхода семян по вариантам

Вариант опыта	Урожайность, ц/га	Выход семян, %
1	23,0	87,0
2	25,3	89,0
3	25,0	87,0
4	25,5	91,0
5	26,0	88,0
6	24,2	86,0
7	24,8	88,0
8	24,2	86,0

Среди вариантов опыта более высокими показателями содержания гумуса в горизонте PU отличались 3 (Стандак Топ + Хайкоут супер соя) и 5 (Гумат калия + + Хайкоут супер соя). Применение инокулянта, обогащенного клубеньковыми бактериями, в значительной степени активизировало процесс фиксации атмосферного азота и деятельность микрофлоры, привело к усилению процесса трансформации органического вещества и оказало позитивное влияние на процесс гумусонакопления. Запасы гумуса в слое 0–20 см на исследуемых вариантах достигали средних значений и находились в диапазоне от 109 до 131,8 т/га, исключение составил вариант 6 Стандак Топ + Гумат калия с изначально низким содержанием гумуса (табл. 1).

Различия между вариантами прослеживались и в показателях ферментативной (каталазной) активности почв. Для всех вариантов опыта она была выше, чем в контроле (табл. 4).

Таблица 4

Микробиологическая активность почв в зависимости от способа предпосевной обработки семян сои, тыс. КОЕ/г почвы

Вариант опыта	Микроорганизмы на МПА	Грибы на среде Чапека	Микроорганизмы на КАА		Олигонитро-филы на среде Эшби	Биогенность	КМ	Ка
			Бактерии	Актиномицеты				
1	11 850 ± 1060	125 ± 77	11 550 ± 353	Н.о.	8000 ± 283	31 525 ± 1955	1,0	2,7 ± 0,10
2	12 850 ± 494	140 ± 0	12 750 ± 636	300 ± 70	13 050 ± 70	39 090 ± 1270	1,0	3,7 ± 0,13
3	8200 ± 494	120 ± 14	3750 ± 70	Н.о.	8350 ± 636	20 420 ± 1211	0,5	3,0 ± 0,00
4	10 000 ± 424	290 ± 42	12 200 ± 283	300 ± 70	12 600 ± 424	35 690 ± 1243	1,3	3,0 ± 0,00
5	41 300 ± 1838	380 ± 46	53 000 ± 1979	400 ± 141	27 600 ± 707	123 080 ± 4711	1,3	3,5 ± 0,15
6	7600 ± 282	145 ± 21	13 700 ± 424	100 ± 70	9300 ± 565	30 945 ± 1362	1,8	5,3 ± 0,18
7	7350 ± 353	60 ± 28	11 650 ± 1202	100 ± 0	8700 ± 707	27 960 ± 2290	1,6	3,8 ± 0,16
8	6600 ± 424	100 ± 7	2750 ± 70	100 ± 0	9500 ± 141	19 150 ± 642	0,4	3,3 ± 0,09

Примечание. КМ (КАА/МПА) – коэффициент минерализации и иммобилизации Е. Н. Мишустина. Ка – каталазная активность почв, мл O_2/г почвы/мин. Н.о. – не обнаружено.

Возрастание каталазной активности свидетельствует об усилении биологической активности почв и процессов трансформации органического вещества микрофлорой (варианты 2, 5, 6, 7) с применением предпосевного протравливания семян сои инокулянтом Хайкоут супер соя, Гуматом калия и инсектофунгицидным препаратом Стандакт топ. Установлена тесная обратная корреляционная связь между содержанием гумуса и параметрами каталазной активности ($r = -0{,}86$).

Как показали результаты исследования, наиболее существенные изменения в составе микрофлоры почв, по сравнению с контролем отмечены для варианта 5 (Гумат калия + Хайкоут супер соя), в котором увеличились в 3 раза численность грибов, в 3,5 раза – олигонитрофилов, в 3,9 раз биогенность почв в целом (табл. 4). Это значительно усилило процесс трансформации органического вещества и деструкцию азотистых соединений гумуса. Увеличению численности всех исследуемых эколого-трофических групп во многом способствовало применение при обработке семян сои инокулянта Хайкоут супер соя, обогащенного бактериями *Bradyrhizobium japonicum*, совместно с Гуматом калия.

Исследованиями установлено, что Гумат калия стимулирует физиологические процессы в растениях сои, способствуя увеличению содержания хлорофилла и каротиноидов в листьях, что приводит к увеличению клубеньковых бактерий. Хайкоут супер соя усиливает развитие азотфиксирующих клубеньков, в которых атмосферный азот восстанавливается до аммиака и усваивается растением. Это приводит к усилению/формированию боковых побегов и увеличению массы семян сои [23].

На исследуемых вариантах опыта наибольшее количество клубеньков отмечено в фазу цветения и начала бобообразования, лучшие результаты достигнуты в вариантах опыта 4, 5, 7 (табл. 5).

Таблица 5

Учет клубеньков на одном растении сои в среднем

Вариант опыта	Фаза цветения – начало бобообразования		Фаза полного созревания	
	кол-во, шт.	вес, г	кол-во, шт.	вес, г
1	82	1,3	15	0,15
2	80	1,5	18	0,19
3	82	1,6	22	0,33
4	87	1,6	24	0,30
5	89	1,7	24	0,33
6	85	1,6	19	0,20
7	89	1,8	24	0,28
8	82	1,4	24	0,25

Переходу питательных элементов в доступную для растений форму во многом способствовало совместное применение с инокулянтом Гумата калия, являющегося своеобразным катализатором протекания почвенных процессов. Это в конечном итоге обусловило повышение урожайности сои до 26 т/га (табл. 3, вариант 5). Усиление процессов иммобилизации азота зафиксировано в вариантах 2 (протравливание семян Стандак Топ) и 4 (предпосевная обработка Гуматом калия), где урожайность сои возросла по сравнению с контролем (23,0 т/га) до 25,3 и 25,5 т/га. Было обращено внимание на показатель выхода семян от общего урожая, используемых для дальнейшего размножения. Самый высокий показатель выхода семенной продукции был получен при предпосевной обработке семян Гуматом калия – 91%, Стандак Топ – 89%, Стандак Топ + Гумат калия + Хайкоут супер соя – 88%. При обработке препаратом Хайкоут супер соя зафиксирован самый низкий (82%) показатель выхода семенной продукции.

Заключение

Таким образом, на первом этапе исследования последействия комплексной предпосевной обработки семян сои инокулянтом Хайкоут супер соя, инсектофунгицидом Стандак Топ и Гуматом калия по сравнению с контролем выявлены:

изменения в микрофлоре и протекании процессов гумусонакопления в агротемногумусовых подбелах, использованных под посевы;

снижение содержания гумуса, вызванное усилением процессов минерализации органического вещества и выносом питательных элементов с растительной массой;

усиление биологической активности почв, о чем свидетельствует возрастание ферментативной активности;

тесная обратная корреляционная связь между содержанием гумуса и параметрами каталазной активности ($r = -0,86$);

изменения в составе микрофлоры почв в посевах сои, наиболее существенные зафиксированы для варианта 5 (Гумат калия + Хайкоут супер соя). Здесь отмечено значительное увеличение численности грибов, олигонитрофилов и биогенности почв в целом. Это способствовало значительному усилению процесса трансформации органического вещества и деструкции азотистых соединений гумуса;

наиболее позитивное, среди всех вариантов опыта, последействие на урожайность применения препаратов Гумата калия и Стандак Топ, а также положительная тенденция в прибавке урожая сои в вариантах: Гумат калия + Хайкоут супер соя, Стандак Топ + Гумат калия + Хайкоут супер соя.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Белявская Л.Г., Рыбальченко А.М. Скрининг коллекции сои по скороспелости и продуктивности в условиях Левобережной лесостепи Украины // Зернобобовые и крупяные культуры.2019.№ 1. С. 63–69. DOI: 10.24411/2309–348X-2019–11074.
2. Мащенко Н.В. Фитосанитарный мониторинг сои. Благовещенск: Зея, 2008. 190 с.
3. Зотиков В.И., Зубарева К.Ю., Варламов Н.В. Отзывчивость различных сортов сои на применение органоминеральных микроудобрений // Зернобобовые и крупяные культуры. 2022. № 2. С. 5–15. DOI: 10.24412/2309–348X-2022–2–5–15.
4. Бутовец Е.С., Лукьянчук Л.М. Результаты испытания штаммов ризобий видов *Bradyrhizobium japonicum* и *Sinorhizobium fredii* на сортах сои Сфера и Муссон в условиях Приморья // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 8. С. 66–69. DOI: 10.24411/0235–2451–2020–10811.
5. Зотиков В.И., Наумкина Т.С., Грядунова Н.В., Сидоренко В.С., Наумкин В.В. Зернобобовые культуры – важный фактор устойчивого экологически ориентированного сельского хозяйства // Зернобобовые и крупяные культуры. 2016. № 1. С. 6–13.
6. Тильба В.А., Синеговская В.Т. Роль симбиотической азотфиксации в повышении фотосинтетической продуктивности сои // Докл. РАСХН. 2012. № 5. С. 16–18.
7. Барзенкова Г.А. Оптимизация технологии предпосевного протравливания и возможности его сочетания с инокуляцией для защиты сои от семенной инфекции // Зернобобовые и крупяные культуры. 2014. № 1. С. 22–30.
8. Бушнева Н.А. Эффективность совместного применения инокулянтов и фунгицидов при обработке семян сои // Масличные культуры. 2019. № 4. С. 119–123. DOI: 679.64:632.952:633.853.52.
9. Кириченко Е., Павлище А.В., Омельчук С.В., Жемойда А.В., Коць С. Физиологические аспекты ответа соево-ризобиального симбиоза на действие фунгицидов Стандак Топ и Февер // Stiinta Agricola. 2020. № 2. С. 59–72. DOI: 10.5281/zenodo.4320984.
10. Чуманова Н.Н., Анохина О.В., Самаров В.М. Оценка влияния гумата калия на ростовые показатели и продуктивность ячменя и картофеля в условиях лесостепной зоны Кемеровской области // Вестн. РАЕН. 2014. № 16. С. 105–110.

11.Касимова Л.В., Проскурина Л.Д., Малюга А.А. Влияние гуминового препарата из торфа Гумостим на урожайность и болезни картофеля // Достижения науки и техники АПК. 2012. № 5. С. 29–32.
12. Дериглазова Г.М. Современные тенденции возделывания сои в России // АгроЗооТехника. 2022. Т. 5, № 3. DOI: 10.15838/alt.2022.5.3.1.
13. Методические указания по регистрационным испытаниям фунгицидов в сельском хозяйстве / под ред. В.И. Долженко. С.-Пб., 2009. 378 с.
14. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
15. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
16. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
17. Орлов Д.С. Бирюкова О.Н., Розанова М.С. Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // Почвоведение. 2004. № 8. С. 918–926.
18. Ознобихин В.И., Синельников Э.П. Характеристика основных свойств почв Приморья и пути их рационального использования. Уссурийск: Приморский с.-х. ин-т, 1985. 72 с
19.Методы почвенной микробиологии и биохимии / под ред. Д.Г. Звягинцева. М: МГУ, 1991. 304 с.
20. Титова В.И., Козлов А.В. Методы оценки функционирования микробоценоза почвы, участвующего в трансформации органического вещества. Нижний Новгород: Нижегородская с.-х. акад., 2012. 64 с.
21. Степанько А.А. Агрогеографическая оценка земельных ресурсов и их использование в районах Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 1992. 115 с.
22.Пуртова Л.Н., Костенков Н.М. Содержание органического углерода и энергозапасы в почвах природных и агрогенных ландшафтов юга Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2009. 124 с.
23. Головина Е.В., Гришечкин В.В. Влияние инокуляции и гумата калия на физиологические и биохимические показатели новых сортов сои // Зернобобовые и крупяные культуры. 2015. № 1. С. 45–52.

REFERENCES

1. Belyavskaya L.G., Rybal'chenko A.M. Skrining kollektsii soi po skorospelosti i produktivnosti v usloviyakh Levoberezhnoi lesostepi Ukrainy = [Screening of soybean collection for early maturity and productivity in the conditions of the Left Bank forest-steppe of Ukraine]. *Legumes and groat crops*. 2019;(1):63–69. DOI: 10.24411/2309-348X-2019-11074. (In Russ.).
2. Mashchenko N.V. Fitosanitarnyi monitoring soi = [Phytosanitary monitoring of soybeans]. Blagoveshchensk: Zeya; 2008. 190 s. (In Russ.).
3. Zotikov V.I., Zubareva K. Yu., Varlamov N.V. Otzyvchivost' razlichnykh sortov soi na primenenie organomineral'nykh mikroudobrenii = [Responsiveness of different soybean varieties to the use of organomineral microfertilizers]. *Legumes and groat crops*. 2022;(2):5–15. DOI: 10.24412/2309-348X-2022-2-5-15. (In Russ.).
4. Butovets E.S., Luk'yanchuk L.M. Rezul'taty ispytaniya shtammov rizobii vidov *Bradyrhizobium japonicum* i *Sinorhizobium fredii* na sortakh soi Sfera i Musson v usloviyakh Primor'ya = [Results of testing strains of rhizobia species *Bradyrhizobium japonicum* and *Sinorhizobium fredii* on soybean varieties Sfera and Musson in Primorye conditions]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2020;34(8):66–69. DOI: 10.24411/0235–2451–2020–10811. (In Russ.).
5. Zotikov V.I., Naumkina T.S., Gryadunova N.V., Sidorenko V.S., Naumkin V.V. Zernobobovye kul'tury – vazhnyi faktor ustoichivogo ehkologicheski orientirovannogo sel'skogo khozyaistva = [Pulses are an important factor in sustainable environmentally oriented agriculture]. *Legumes and groat crops*. 2016;(1):6–13. (In Russ.).
6. Til'ba V.A., Sinegovskaya V.T. Rol' simbioticheskoi azotfiksatsii v povyshenii fotosinteticheskoi produktivnosti soi = [The role of symbiotic nitrogen fixation in increasing the photosynthetic productivity of soybean]. *Doklady Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennyh nauk*. 2012;(5):16–18. (In Russ.).
7. Barzenkova G.A. Optimizatsiya tekhnologii predposevnogo protravlivaniya i vozmozhnosti ego sochetaniya s inokulyatsiei dlya zashchity soi ot semennoi infektsii = [Optimization of pre-sowing treatment technology and the possibility of combining it with inoculation to protect soybeans from seed infection]. *Legumes and groat crops*. 2014;(1):22–30. (In Russ.).
8. Bushneva N.A. Ehffektivnost' sovmestnogo primeneniya inokulyantov i fungitsidov pri obrabotke semyan soi = [The effectiveness of combined use of inoculants and fungicides when treating soybean seeds]. *Oil crops*. 2019;(4):119–123. DOI: 679.64:632.952:633.853.52. (In Russ.).
9. Kirichenko E., Pavlishche A.V., Omel'chuk S.V., Zhemoida A.V., Kots' S. Fiziologicheskie aspekty otveta soevo-rizobial'nogo simbioza na deistvie fungitsidov Standak Top i Fever = [Physiological aspects

of the response of soybean-rhizobia symbiosis to the action of fungicides Standac Top and Fever]. *Stiinta agricola*. 2020;(2):59–72. (In Russ.).

10. Chumanova N.N., Anokhina O.V., Samarov V.M. Otsenka vliyaniya gumata kaliya na rostovye pokazateli i produkti

vnost' yachmenya i kartofelya v usloviyakh lesostepnoi zony Kemerovskoi oblasti = [Assessment of the influence of potassium humate on the growth performance and productivity of barley and potatoes in the forest-steppe zone of the Kemerovo region]. *Vestnik RAEN*. 2014;(16):105–110. (In Russ.).

11. Kasimova L.V., Proskurina L.D., Malyuga A.A. Vliyanie guminovogo preparata iz torfa Gumostim na urozhainost' i bolezni kartofelya = [The effect of humic preparation from peat Gumostim on potato yields and diseases]. *Achievements of science and technology in agro-industrial complex*. 2012;(5):29–32. (In Russ.).

12. Deriglazova G.M. Sovremennye tendentsii vozdelyvaniya soi v Rossii = [Current trends in soybean cultivation in Russia]. *Agricultural and Lifestock Technology*. 2022;5(3). DOI: 10.15838/alt.2022.5.3.1. (In Russ.).

13. Metodicheskie ukazaniya po registratsionnym ispytaniyam fungitsidov v sel'skom khozyaistve = [Guidelines for registration testing of fungicides in agriculture]. Ed. by V.I. Dolzhenko. St. Petersburg; 2009. 378 s. (In Russ.).

14. Dospekhov B.A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoi obrabotki rezul'tatov issledovanii) = [Methodology of field experience (with the basics of statistical processing of research results)]. M: Agropromizdat; 1985. 351 s. (In Russ.).

15. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii = [Classification and diagnostics of soils in Russia]. Smolensk: Oikumena; 2004. 342 s. (In Russ.).

16. Arinushkina E.V. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv = [Soil Chemical Analysis Guide]. Moscow: Moscow State Univ.; 1970. 487 s. (In Russ.).

17. Orlov D.S., Biryukova O.N., Rozanova M.S. Dopolnitel'nye pokazateli gumusnogo sostoyaniya pochv i ikh geneticheskikh gorizontov = [Additional indicators of the humus status of soils and their genetic horizons]. *Pochvovedenie*. 2004;(8):918–926. (In Russ.).

18. Oznobikhin V.I., Sinel'nikov Eh.P. Kharakteristika osnovnykh svoistv pochv Primor'ya i puti ikh ratsional'nogo ispol'zovaniya = [Characteristics of the main properties of soils in Primorye and ways of their rational use]. Ussuriisk: Primorskii sel'skohozyaistvennyi institut; 1985. 72 s. (In Russ.).

19. Metody pochvennoi mikrobiologii i biokhimii = [Methods of soil microbiology and biochemistry]. Ed. by D.G. Zvyagintsev. Moscow: Moscow State Univ.; 1991. 304 s. (In Russ.).

20. Titova V.I., Kozlov A.V. Metody otsenki funktsionirovaniya mikrobotsenoza pochvy, uchastvuyushchego v transformatsii organicheskogo veshchestva = [Methods for assessing the functioning of soil microbial communities involved in the transformation of organic matter]. Nizhniy Novgorod: Nizhegorodskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaistvennaya akademiya; 2012. S. 64. (In Russ.).

21. Stepan'ko A.A. Agrogeograficheskaya otsenka zemel'nykh resursov i ikh ispol'zovanie v raionakh Dal'nego Vostoka = [Agrogeographical assessment of land resources and their use in the Far East]. Vladivostok: Dal'nauka; 1992. 115 s. (In Russ.).

22. Purtova L.N., Kostenkov N.M. Soderzhanie organicheskogo ugleroda i energozapasy v pochvakh prirodnykh i agrogennykh landshaftov yuga Dal'nego Vostoka Rossii = [Organic carbon content and energy reserves in soils of natural and agrogenic landscapes in the south of the Russian Far East]. Vladivostok: Dal'nauka; 2009. 124 s. (In Russ.).

23. Golovina E.V., Grishechkin V.V. Vliyanie inokulyatsii i gumata kaliya na fiziologicheskie i biohimicheskie pokazateli novyh sortov soi = [The influence of inoculation and potassium humate on the physiological and biochemical parameters of new soybean varieties]. *Legumes and groat crops*. 2015;(1):45–52. (In Russ.).

Научная статья
УДК 548.735:541.49:661.74:546.791.6–381′161
DOI: 10.31857/S0869769824020151
EDN: lcmiau

Структурная химия разнолигандных карбоксилато-фторидных и нейтральных фторидных комплексных соединений уранила (обзор)

Р.Л. Давидович

Рувен Лейзерович Давидович
доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник
Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия
davidovich@ich.dvo.ru, ruven.davidovich@gmail.com
http://orcid.org/0000-0002-8473-3580

Аннотация. Систематизированы и обсуждены кристаллические структуры разнолигандных карбоксилато-фторидных и нейтральных фторидных комплексных соединений уранила, изученных монокристальным методом рентгеноструктурного анализа. Определены кристаллохимические особенности строения данного класса соединений уранила: координационный полиэдр шестивалентного атома урана в структурах разнолигандных карбоксилато-фторидных и нейтральных фторидных комплексных соединений уранила (за исключением трех гексадентатно-бипирамидальных соединений) имеет пентагонально-бипирамидальное строение. Атомы кислорода уранильной группы расположены на вертикальной оси пентагональной бипирамиды перпендикулярно экваториальной плоскости, в которой расположены пять атомов координированных лигандов. В структурах димерных и полимерных разнолигандных карбоксилато-фторидных и нейтральных фторидных комплексных соединений уранила мостиковые связи (за исключением одного димерного соединения, в котором мостиковые связи в димере образованы атомами кислорода) образуют фторидные атомы.

Ключевые слова: уранил, фторид, разнолигандный, петагональная бипирамида, структура, карбоксилаты, нейтральные лиганды

Для цитирования: Давидович Р.Л. Структурная химия разнолигандных карбоксилато-фторидных и нейтральных фторидных комплексных соединений уранила (обзор) // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 2. С. 170–186. http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020151, EDN: lcmiau

Original article

Structural chemistry of mixed-ligand carboxylate-fluoride and neutral fluoride complexes of uranyl (review)

R.L. Davidovich

Ruven L. Davidovich
Doctor of Sciences in Chemistry, Professor, Chief Researcher
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia,
davidovich@ich.dvo.ru, ruven.davidovich@gmail.com
http://orcid.org/0000-0002-8473-3580

Abstract. The crystal structures of mixed-ligand carboxylate-fluoride and neutral fluoride complexes of uranyl studied by the single-crystal X-ray diffraction method have been systematized and discussed. The crystal chemical features of the structures of this class of uranyl compounds were determined: the coordination polyhedron of the hexavalent uranium atom in the structures of the mixed-ligand carboxylate-fluoride and neutral fluoride complexes of uranyl (excluding three hexadentate-bipyramidal compound) has a pentagonal-bipyramidal structure: the oxygen atoms of the uranyl group are located on the vertical axis of the pentagonal bipyramid, perpendicular to the equatorial plane in which five atoms are located. In the crystal structures of dimeric and polymeric mixed-ligand carboxylate-fluoride and neutral fluoride complexes of uranyl (with the exception of one compound in which the bridging bonds in the dimer are formed by oxygen atoms) the fluoride bridges form fluoride atoms.

Keywords: uranyl, fluoride, mixed-ligand, pentagonal bipyramid, structure carboxylate, neutral ligands

For citation: Davidovich R.L. Structural chemistry of mixed-ligand carboxylate-fluoride and neutral fluoride complexes of uranyl (review). *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(2):170–186. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020151, EDN: lcmiau

Введение

В [1] систематизирована и обсуждена структурная химия разнолигандных неорганических фторидных комплексных соединений уранила, включающих сульфато-, селенато-, фосфато-, арсенато- и хромато-фторидные соединения. В продолжение выполненных исследований в настоящей работе рассмотрена и обсуждена структурная химия разнолигандных фторидных комплексных соединений уранила с остатками органических кислот и нейтральными О-донорными лигандами. Статья состоит из трех частей. В первой проанализированы и обсуждены разнолигандные карбоксилато-фторидные комплексные соединения уранила, вторая посвящена карбоксилато-фторидным комплексным соединениям уранила с тремя донорными центрами, в третьей рассмотрены разнолигандные фторидные комплексные соединения уранила с нейтральными О-донорными лигандами.

1. Карбоксилато-фторидные комплексные соединения

Монокарбоновые кислоты могут координироваться к атому U(VI) карбоксильным атомом O монодентатно, обоими атомами O карбоксильной группы бидентатно-циклически, бидентатно-мостиково, тридентатно (бидентатно-циклически мономостиково) и тетрадентатно (бидентатно-циклически бимостиково).

При исследовании системы $UO_2(ac)_2 \cdot 2H_2O$/HFaq/изоникотиновая кислота наряду с кислородсодержащими комплексными соединениями уранила получены два разнолигандных изоникотинато-фторидных комплексных соединения уранила: $[UO_2F_2(C_5H_5NCO_2)]$ и $[(UO_2F_2)_2(C_5H_5NCO_2)]\cdot H_2O$ [2].

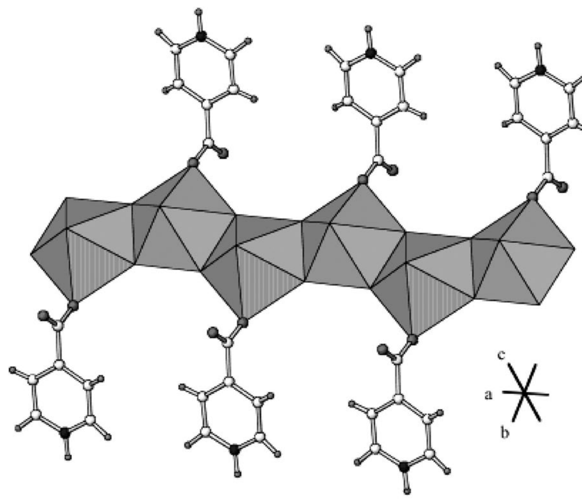


Рис. 1. Фрагмент одномерной цепи в структуре $[UO_2F_2(C_5H_5NCO_2)]$ вдоль [100] направления [2]

1.1. $[UO_2F_2(C_5H_5NCO_2)]$

Соединение $[UO_2F_2(C_5H_5NCO_2)]$ образует одномерную структуру, содержащую бесконечные цепи, образованные из реберно-связанных пентагонально-бипирамидальных полиэдров UO_5F_2, простирающихся вдоль направления [100] и разделенных изоникотинатными анионами (рис. 1) [2]. Атом U в бесконечной цепи координирован аксиально двумя атомами O и экваториально четырьмя мостиковыми атомами F и карбоксильным атомом O изоникотинатного лиганда. В рамках связанности структура $[UO_2F_2(C_5H_5NCO_2)]$ может быть описана как $[UO_{2/1}F_{4/2}O_{1/1}]$.

В линейной группе UO_2^{2+} (∠ O(1)=U(1)=O(2) 179,9(3)°) полиэдра UO_3F_4 расстояния U=O равны 1,758(5) и 1,763(6) Å. Длины экваториальных мостиковых связей U–F составляют 2,322(3) × 2 и 2,329(3) × 2 Å, а карбоксильный атом O лиганда $C_5H_5NCO_2$ удален от центрального атома на расстояние 2,371(6) Å. Группа N(1)–H(1) лиганда образует водородную связь с карбонильным атомом O(4) карбоксильной C(1)–O(3) O(4) группы N(1)–H(1)···O(4) 2,762(9) Å, объединяющую структурные элементы в трехмерную сеть.

1.2. $[(UO_2F_2)_2(C_5H_5NCO_2)]\cdot H_2O$

Кристаллы $[(UO_2F_2)_2(H_5NCO_2)]\cdot H_2O$ имеют двухмерную слоистую структуру (рис. 2), содержащую два уникальных сорта атомов U, образующих пентагонально-бипирамидальные полиэдры UO_3F_4 [2]. Каждый атом U в полиэдре связан аксиально с двумя атомами кислорода (U(1)=O 1,765(6) и 1,779(6) Å, U(2)=O 1,765(6) и 1,769(6) Å), образуя практически линейные уранильные группы (∠ O(1)=U(1)=O(2) 179,1(3)° и O(2)=U(1)=O(1) 179,2(3)°). Как и в $[UO_2F_2(C_5H_5NCO_2)]$, в структуре $[(UO_2F_2)_2(C_5H_5NCO_2)]\cdot H_2O$ атомы U(1) и U(2) связаны экваториально с четырьмя мостиковыми атомами F и мостиковым атомом O карбок-

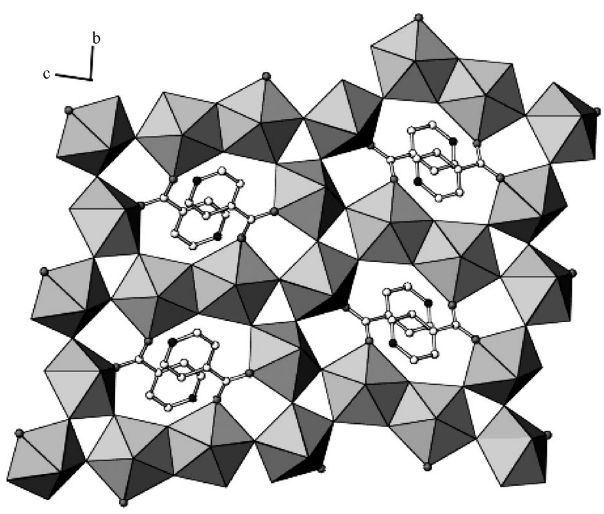


Рис. 2. Фрагмент слоя структуры $[UO_2F_2]_2[C_5H_5NCO_2]\cdot H_2O$ вдоль [010] направления [2]

сильной группы изоникотинатного аниона, которая делит свои атомы O между двумя атомами U. Длины связей U(1)–F изменяются в интервале 2,281(5)–2,339(5) Å, а расстояния U(2)–F практически одинаковые: 2,314(5)–2,317(6) Å. Близкие значения имеют и длины связей U(1)–O и U(2)–O: 2,350(6) и 2,374(6) Å соответственно. Длины связей C(1)–O(3) и C(1)–O(6) в карбоксильной группе C(1)–O(3) O(6) равны соответственно 1,288(10) и 1,237(10) Å.

Два полиэдра U(1) O_3F_4, деля общее ребро, образуют димеры, в то время как полиэдры U(2) O_3F_4, связанные друг с другом вершинами, образуют бесконечные зигзагообразные цепи вдоль [010] направления. Димеры пентагональных бипирамид U(1) O_3F_4 вершинами объединяются с полиэдрами U(2) O_3F_4 бесконечных цепей, образуя в слоях эллиптические восьмичленные отверстия размером 5,9 × 2,0 Å.

Группы пиридина изоникотинатных лигандов расположены выше и ниже образованных в слое отверстий. В межслоевой области имеются каналы примерного размера 3,7 × 3,5 Å, простирающиеся вдоль направления [010] и окруженные пентагональными бипирамидами атомов U и изоникотинатными группами. Молекулы кристаллизационной воды занимают каналы и образуют водородные связи N–H···O и O–H···O(1), равные 2,718 и 2,817 Å соответственно.

1.3. $[(UO_2)_3F_6(HisoNic)(H_2O)]\cdot H_2O$

Соединение $[(UO_2)_3F_6(HisoNic)(H_2O)]\cdot H_2O$ синтезировано замещением иона Cl^- на ион F^- в системе с изоникотиновой кислотой [3]. В структуре соединения $[(UO_2)_3F_6(HisoNic)(H_2O)]\cdot H_2O$ содержится три кристаллографических уникальных центра U(VI), формирующих пентагонально-бипирамидальные полиэдры.

Экваториальная плоскость полиэдра атома U(1) слагается тремя атомами F и двумя атомами O бидентатно координированной молекулы изоникотиновой кислоты. Атом U(2) экваториально координирован четырьмя атомами F и молекулой H_2O, а атом U(3) образует координационные связи с пятью атомами F. Все атомы F в структуре являются мостиковыми лигандами, объединяющими атомы U в слоистую структуру.

Слои в структуре $[(UO_2)_3F_6(HisoNic)(H_2O)]\cdot H_2O$ имеют иное строение, чем в рассмотренной выше структуре $[(UO_2F_2)_2(C_5H_5NCO_2)]\cdot H_2O$ [2], что обусловлено различной мостиковой функцией изоникотиновой молекулы. В $[(UO_2)_3F_6(HisoNic)(H_2O)]\cdot H_2O$ изоникотиновый лиганд координирован обоими атомами O карбоксильной группы к одному атому U, а в структуре $[(UO_2F_2)_2(C_5H_5NCO_2)]\cdot H_2O$ каждый из двух кристаллографических атомов U связан с одним атомом O бидентатно-мостикового изоникотинатного лиганда.

В полиэдрах атомов U(1)–U(3) в практически линейных уранильных группах (∠ O(1)=U(1)=O(2) 179,1(2)°, O(3)=U(1)=O(4) 179,4(2)° и O(5)=U(1)=O(6) 178,6(2)°) длины связей U=O варьируют от 1,752(5) до 1,769(5) Å. Расстояния U(1)–F изменяются в небольшом интервале 2,273(4)–2,283(4) Å, а длины связей U(2)–F и U(3)–F имеют характерные для мостиковых U–F связей во фторидных комплексных соединениях уранила значения [4]. Атомы O карбоксилатной группы C(6)–O(7) O(8) молекулы изоникотиновой кислоты отстоят от атома U(1) на практически одинаковом расстоянии: 2,461(5)–2,470(4) Å. Длины связей C(6)–O в группе C(6)–O(7) O(8) изоникотинового лиганда равны 1,255(7) и 1,263(7) Å. Координированная молекула H_2O удалена от атома U(2) на расстояние 2,449(5) Å.

Группа N(1)–H(1) образует с атомом O(10) кристаллизационной молекулы $H_2O(10)$ прочную водородную связь N(1)–H(1)···O(10) 2,705(7) Å. Сравнительно слабая водородная связь устанавливается между координированной молекулой $H_2O(3)$ и атомом F(1) полиэдра атома U(1) (O(3)–H(3)···F(1) 2,894(6) Å).

1.4. $[UO_2F(C_5H_6O_4)]\cdot 2H_2O$

В ряду структурно исследованных разнолигандных карбоксилато-фторидных комплексных соединений уранила кристаллическая структура $[UO_2F(C_5H_6O_4)]\cdot 2H_2O$, содержащая гексагонально-бипирамидальные полиэдры UO_6F_2[1], является уникальной [6]: это соединение имеет одномерную цепочную структуру, составленную из уранильных оксофторидных димеров, перекрестно связанных глутаратными карбоксильными группами. Атомы U, O(3) карбоксильной группы и атом углерода C(3) группы C(3) H_2 глутаратного лиганда занимают частные позиции в решетке.

Координированные шестью кислородными и двумя фторидными лигандами атомы U образуют гексагонально-бипирамидальные полиэдры $[UO_6F_2]$, каждый из которых, обобществляя экваториальное ребро с соседним полиэдром, формирует димеры. Атомы U аксиально связаны с двумя атомами O, образуя линейные группы UO_2^{2+} (∠ O(1)=U(1)=O(1′) 179,5(5)°) с длинами U(1)=O связей 1,788(8) × 2 Å. Экваториальные координационные позиции вокруг атома U заняты двумя фторидными и четырьмя карбоксилатными оксидными лигандами. Длины связей U–F в полиэдре равны 2,353(5) × 2 Å, а расстояния $U\text{-}O_{carb}$ практически одинаковые и составляют 2,492(7) × 2 и 2,494(8) × 2 Å.

Строение фрагмента цепи димеров $[UO_2F(C_5H_6O_4]$ в структуре $[UO_2F(C_5H_6O_4)]\cdot 2H_2O$, простирающегося вдоль направления [100], представлено на рис. 3. В структуре $[UO_2F(C_5H_6O_4)]\cdot 2H_2O$ кристаллизационная молекула $H_2O(4)$ образует водородные связи с оксидным атомом O(3) димеров и атомом O(5) второй молекулы H_2O с расстояниями O(4)···O(3) и O(4)···O(5), равными 2,854 и 2,843 Å соответственно.

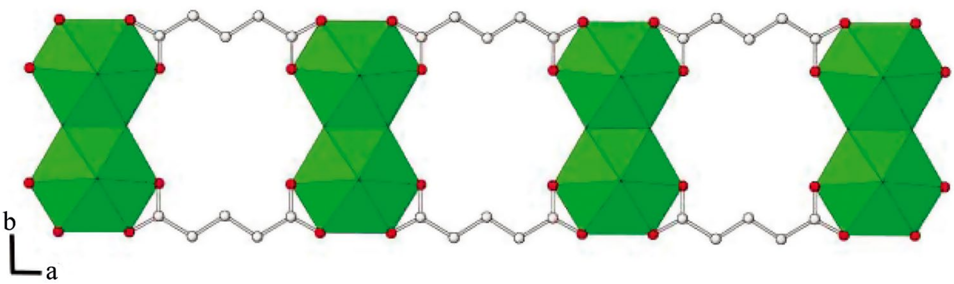


Рис. 3. Глутаратные цепи уранила в структуре $[UO_2F(C_5O_4H_6)]$ вдоль [100] направления [6]

Из рассмотренных и анализированных в настоящей работе и в [1] 56 кристаллических структур разнолигандных комплексных соединений уранила лишь в кристаллических структурах $[UO_2F(C_5H_6O_4)]\cdot 2H_2O$, $Ba_2[(UO_2)_3(suc)_3F_4]\cdot 5H_2O$ и $Ba[(UO_2)_2(glt)_2(Hglt)F]\cdot 8H_2O$ содержатся гексагонально-бипирамидальные координационные полиэдры атома U.

1.5. $(C_2H_{10}N_2)_{1,5}[UO_2(C_3H_2O_4)_2F]\cdot H_2O$

В работе [7] сообщено о синтезе разнолигандного карбоксилато-фторидного комплексного соединения уранила $(C_2H_{10}N_2)_{1,5}[UO_2(C_3H_2O_4)_2F]\cdot H_2O$, содержащего атомы F и остатки дикарбоновой малоновой кислоты. Оно образовано из катио-

[1] Гексагонально-бипирамидальные координационные полиэдры UO_6F_2 установлены также в кристаллических структурах $Ba_2[(UO_2)_3(suc)_3F_4]\cdot 5H_2O$ и $Ba[(UO_2)_2(glt)_2(Hglt)F]\cdot 8H_2O$, где suc – $C_4H_4O_4^{2-}$ (сукцинат-ион), glt – $C_5H_6O_4^{2-}$ (глутарат-ион) [5].

нов $(C_2H_{10}N_2)^{2+}$, разнолигандных комплексных анионов $[UO_2(C_3H_2O_4)_2F]^{3-}$ и молекул кристаллизационной H_2O. Комплексный анион $[UO_2(C_3H_2O_4)_2F)]^{3-}$, имеющий пентагонально-бипирамидальное строение, образован катионом UO_2^{2+}, связанным в экваториальной плоскости полиэдра с двумя 1,5-бидентатными малоновыми лигандами и одним координированным F лигандом. Такое же пентагонально-бипирамидальное строение имеет и комплексный анион соединения $(C_6H_{16}N_2)[UO_2(C_3H_2O_4)_2(H_2O)]\cdot 2H_2O$ [6], но, в отличие от $(C_2H_{10}N_2)_{1,5}[UO_2(C_3H_2O_4)_2F]\cdot H_2O$, в нем пятая позиция в экваториальной плоскости полиэдра занята не терминальным атомом F, а координированной молекулой H_2O.

В комплексном анионе $[UO_2(C_3H_2O_4)_2F)]^{3-}$ группа UO_2^{2+} почти линейная (∠ O(9)=U(1)=O(10) 177,9(2)°) с длинами связей U=O, равными 1,766(5) и 1,775(5) Å. В экваториальной плоскости полиэдра длина терминальной связи U–F равна 2,281(4) Å, а мостиковые расстояния U–O лежат в интервале 2,357(5)–2,393(4) Å.

Группы N(1)–H(15) катиона enH_2^{2+} образуют с карбонильными атомами O(3) и O(4) карбоксилатной группы молонатного дианиона водородные связи 2N(1)–H(15B)···O(4) 2,27(8) Å и 2N(1)–H(15C)···O(3) 2,791(8) Å. Водородные связи устанавливает также группа N(2)–H(15) катиона с экваториальным атомом F и атомом O(11) кристаллизационной молекулы $H_2O(11)$ 3N(2)–H(15E)···F(1) 2,681(7) Å и 3N(2)–H(15F)···O(11) 2,735(7) Å. Водородные связи объединяют структурные элементы в трехмерное образование.

1.6. $Na_4[(UO_2)_2(OCH_2COO)_2F_4]\cdot 6H_2O$

Среди исследованных кристаллических структур разнолигандных карбосилато-фторидных комплексных соединений уранила структура $Na_4[(UO_2)_2(OCH_2COO)_2F_4]\cdot 6H_2O$ является уникальной [8]. Она составлена из дискретных димерных комплексов, в которых общее экваториальное ребро каждого димера образовано не мостиковыми атомами F–F, как в структурах фторидных [4] и разнолигандных неорганических фторидных комплексных соединений уранила [1], а мостиковыми атомами O–O′ депротонированных гидроксильных групп глюколатных лигандов [8].

В соединении $Na_4[(UO_2)_2(OCH_2COO)_2F_4]\cdot 6H_2O$ атом U окружен семью лигандами, два из которых фторидных и пять оксидных, образуя пентагонально-бипирамидальную геометрию. В аксиальных позициях пентагональной бипирамиды расположены терминальные атомы O, ковалентно связанные с атомом U в группу UO_2^{2+}, которая расположена перпендикулярно экваториальной плоскости бипирамиды. Два атома F и три атома O, координированных атомом U, формируют экваториальную плоскость бипирамиды. Депротонированные α-гидроксиатомы кислорода глюколатных лигандов мостиково соединяют два соседних фрагмента урана, составляя дискретные димеры из двух пентагональных бипирамид с общим ребром. Каждый оксиацетатный лиганд имеет три потенциальных оксидных донорных центра, два из которых, карбоксильный и депротонированный α-гидроксиатомы кислорода, координированы в экваториальной плоскости атомом U.

В почти линейной группе UO_2^{2+} (∠ O(1)=U(1)=O(2) 177,9(2)°) длины связей U=O равны 1,802(5) и 1,807(5) Å. В экваториальной плоскости пентагональной бипирамиды терминальные атомы F удалены от атома U на расстояния 2,262(4) и 2,244(4) Å, а длины мостиковых связей U–O изменяются в интервале 2,319(4)–2,396(4) Å. В глюколатном лиганде длины связей C–O в карбоксильной группе C(2)–O(4) O(5) составляют 1,231(8) и 1,288(8) Å, а расстояние от атома U до депротонитрованного атома O гидроксильной группы лиганда – 1,429(8) Å.

Кристаллическая структура $Na_4[(UO_2)_2(OCH_2COO)_2F_4]\cdot 6H_2O$ содержит слои катионов Na^+, имеющих искаженно октаэдрическую геометрию. Длины связей

Na–F равны 2,271(4)–2,403(4) Å, а длины связей Na–O_w изменяются от 2,301(5) до 2,637(6) Å. Молекулы H_2O образуют с атомами O и F средние по силе водородные связи O_w(2)–H_W(21)···O(4) 2,717 Å и O_w(3)–H_W(32)···F(2) 2,865 Å, стабилизирующие структуру.

1.7. $Na_3[UO_2F_3(C_2O_4)]\cdot 6H_2O$

В работе [9] приведены результаты рентгеновского дифрактометрического исследования монокристальным методом большой группы разнолигандных оксалатнофторидных комплексных соединений урана $M_3UO_2F_3(C_2O_4)$–nH_2O (M = Na, K, Rb, Cs) и $M_3UO_2F(C_2O_4)_2$-n′H_2O (M = NH_4, Na, K, Rb, Cs), для которых были получены параметры элементарной ячейки, симметрия, объем, плотность (расчетная и экспериментальная), а также число формульных единиц в решетке. В [9] кристаллическая структура определена лишь для соединения $Na_3[UO_2F_3(C_2O_4)]\cdot 6H_2O$.

Структура $Na_3[UO_2F_3(C_2O_4)]\cdot 6H_2O$ составлена из катионов Na^+, одномерных разнолигандных комплексных анионов $[UO_2F_3(C_2O_4)]^{3-}$ и кристаллизационных молекул H_2O. В комплексном анионе $[UO_2F_3(C_2O_4)]^{3-}$ атом U(VI), имеющий пентагонально-бипирамидальную геометрию, окружен двумя аксиальными атомами O, образуя с ними группу UO_2^{2+}, двумя карбоксильными атомами O бидентатно координированного аниона $C_2O_4^{2-}$ и тремя терминальными атомами F, формирующими экваториальную плоскость пентагональной бипирамиды.

В группе UO_2^{2+} (∠ O(1)=U(1)=O(2) 179(6)°) длины связей U=O(1) и U=O(2) равны 1,80(4) и 1,82(4) Å. Длины терминальных связей U–F лежат в диапазоне 2,24(3)–2,30(3) Å, а расстояния от атома U до мостиковых карбоксильных атомов O аниона $C_2O_4^{2-}$ составляют 2,40(4) и 2,43(4) Å.

В анионе $C_2O_4^{2-}$ длины связей C(1)–O(4) и C(2)–O(3) с карбоксильными атомами O равны 1,26(6) и 1,30(6) Å, а с карбонильными атомами кислорода C(1)–O(5) и C(2)–O(6) – 1,21(6) и 1,23(6) Å. Катионы $Na(1)^+$ и $Na(4)^+$ занимают общие позиции в структуре, а катионы $Na(2)^+$ и $Na(3)^+$ – частные. Катионы $Na(1)^+$ окружены каждый семью атомами кислорода с расстояниями от 2,46(4) до 2,54(4) Å, а катионы $Na(4)^+$ – шестью, расстояния до них от 2,46(4) до 2,65(4) Å. Окружение катионов $Na(2)^+$ составляет четыре атома F с длинами связей Na(2)–F от 2,33(5) до 2,35(5) Å и два атома O с расстояниями Na(2)–O 2,46(2) × 2 Å. Катионы $Na(3)^+$ координированы шестью атомами O с длинами связи Na(3)–O, изменяющимися от 2,35(3) до 2,47 (4) Å.

В структуре $Na_3[UO_2F_3(C_2O_4)]\cdot 6H_2O$ атомы H молекул H_2O не были локализованы. Однако наличие укороченных расстояний между атомами O молекул воды, атомами F и атомами O органического лиганда, а также соседних молекул H_2O позволяет предположить образование водородных связей в структуре. Катионы Na^+ и водородные связи объединяют структурные элементы в трехмерное образование.

1.8. $[(UO_2)$ F(HCpFeTP)$(PO_4H_2)]\cdot 2H_2O$

В работе [10] сообщено о синтезе и исследовании кристаллической структуры комплексных соединений уранила, два из которых – $[(UO_2)$ F(HCpFeTP)$(PO_4H_2)]\cdot 2H_2O$ и $[(UO_2)_2F_3(H_2O)$(CpFeP)] – являются разнолигандными карбоксилатофторидными комплексными соединениями уранила.

Структура $[(UO_2)$ F(HCpFeTP)$(PO_4H_2)]\cdot 2H_2O$ содержит кристаллографически уникальный атом U, пентагонально-бипирамидально координированный аксиально двумя атомами O уранильной группы, и экваториально – двумя F– ионами (F(1) и F(1′), двумя атомами O аниона $H_2PO_4^-$ и депротонированным атомом O(5) карбоксильной группы C(1)-(O5)(O6) нейтрального металлолиганда [CpFeTP] [10].

Петагонально-бипирамидальные полиэдры симметрично эквивалентных центров U, реберно-связанные атомами F, образуют димеры, которые простираются в виде одномерных нейтральных цепей в направлении [100]. Эти цепи водородно связаны одна с другой карбоксильной кислотой монопротонированного терефталата металлолиганда и молекулами H_2O с образованием трехмерной сети. Группы H_2PO_4 образуют водородные связи с решеточными молекулами H_2O и депротонированными атомами O карбоксильной кислоты металлолиганда [HCpFeTP].

В структуре $[(UO_2)\,F(HCpFeTP)(PO_4H_2)]\cdot 2H_2O$ группа UO_2^{2+} практически линейна (∠ O(1)=U(1)=O(2) 179,01(10)°), длины связей U=O равные и составляют 1,770(2) и 1,773(2) Å. В экваториальной плоскости петагонально-бипирамидального полиэдра величины длин связей U–F имеют практически одинаковые значения 2,3625(19) и 2,3643(18) Å, а расстояния U–O изменяются в интервале 2,327(2)–2,373(2) Å.

Группы O–H аниона $H_2PO_4^-$ и O(10)–H(12) фрагмента нейтральной карбоксильной кислоты C(8)–O(9) O(10)–H(12) образуют весьма прочные водородные связи с решеточной молекулой $H_2O(12)$ и атомами O карбоксилатных групп металлолиганда [HCpFeTP]: O(7)–H(10)···O(12) 2,614(3), O(8)–H(11)···O(6) 2,591(3) и O(10)–H(12)···O(9) 2,604(3) Å, объединяющие структурные элементы в трехмерное образование.

1.9. $[(UO_2)_2F_3(H_2O)(CpFeP)]$

Соединение $[(UO_2)_2F_3(H_2O)(CpFeP)]$ содержит два кристаллографически уникальных атома U(1) и U(2), формирующих пентагонально-бипирамидальные полиэдры [10]. Связанные с аксиальными атомами кислорода O(1) и O(2) и соответственно O(3) и O(4), атомы U(1) и U(2) образуют группы UO_2^{2+}, которые практически линейны (∠ O(1)=U(1)=O(2) 179,9(5)°, O(3)=U(1)=O(4) 179,1(5)°), с длинами связей U(1)=O и U(2)=O, равными 1,769(10), 1,787(8) Å и 1,748(10), 1,761(10) Å соответственно. В экваториальной плоскости пентагональных бипирамид атом U(1) координационно связан с четырьмя фторидными лигандами и молекулой H_2O, а U(2) – с тремя атомами O мостикового металлолиганда $[CpFeP]^-$, а оставшиеся вершины делит с атомами F(1), F(2) полиэдра атома U(1), образуя нейтральные одномерные цепи, которые простираются в [010] направлении. Полиэдры атомов U(1) делят общее ребро F(3)–F(4) со своим симметрично эквивалентным полиэдром, увеличивая в два раза ширину цепей. Цепи дополнительно декорированы металлолигандами $[CpFeP]^-$.

В полиэдре атома U(1) длины экваториальных связей U–F лежат в интервале 2,303(7)–2,326(5) Å, а координированная молекула H_2O удалена от центрального атома на расстояние 2,440(9) Å. Расстояния U(2)–F в полиэдре атома U(2) такие же, как в полиэдре атома U(1), а длины связей U(2)–O изменяются в бóльшом интервале значений: 2,310(8)–2,507(10) Å.

Координированная молекула $H_2O(9)$ образует водородные связи с атомами O карбоксилатогрупп металлолиганда $[CpFeP]^-$ с длинами связей O(9)···O(8) 2,660 и O(9)···O(5) 2,726 Å.

1.10. $[(UO_2)\,F(H_2L^1)_{0,5}]\cdot H_2O$

Структура $[(UO_2)\,F(H_2L^1)_{0,5}]\cdot H_2O$ составлена из вершинно-связанных пентагонально-бипирамидальных полиэдров UO_5F_2 и гексадентатных тетракарбоксильных лигандов [11]. Независимая часть элементарной ячейки структуры $[(UO_2)\,F(H_2L^1)_{0,5}]\cdot H_2O$ содержит один UO_2^{2+} катион, один фторидный анион, половину дважды депротонированной тетракарбоксильной кислоты $(H_2L^1)^{2-}$, расположенной в центре инверсии, и одну решеточную молекулу H_2O. Семикоординированные атомы U(VI) образуют UO_5F_2 полиэдры пентагонально-бипирамидальной геометрии. Аксиальные позиции в полиэдре заняты двумя атомами O катиона UO_2^{2+}, а экваториальная плоскость составлена из трех атомов O от трех L^1 лигандов и симметрично расположенных двух F^- анионов. Две соседние группы UO_5F_2, связанные вместе одной карбоксильной группой C(1)–O(1)(O(2) и одним F^- ионом, образуют вершинно-связанные UO_5F_2 одномерные цепи с F^- анионами в общих вершинах.

Одна карбоксильная группа в иминодиуксусном фрагменте C(4)–O(3) O(4) мостиково связывает один катион UO_2^{2+} монодентатно, в то время как другая карбоксилатная группа C(1)–O(1) O(2) связывает два симметрично расположенных уранильных катионов в бидентатной мостиковой моде. В результате каждый L^1 лиганд связывает посредством их четырех карбоксильных групп шесть катионов уранила двух соседних цепей, что приводит к формированию гофрированного двумерного слоя в плоскости *ab*. Молекулы решеточной воды расположены между слоями.

В полиэдре UO_5F_2 длины связей U=O лежат в диапазоне 1,70(6)–1,787(6) Å, а угол O(5)=U(1)=O(6) в ионе уранила незначительно отличается от 180°. Расстояния U–F в экваториальной плоскости пентагонально-бипирамидального полиэдра близкие и составляют 2,326(4) и 2,347(4) Å, а длины мостиковых связей U–O варьируют в диапазоне 2,346(6)–2,405(6) Å.

Лиганд L^1 дважды депротонирован, а оставшиеся два протона переходят к атомам N, которые взаимодействуют с соседними атомами кислорода карбоксилатогрупп. Однако их нельзя рассматривать как водородные связи, так как углы связи D–H···A значительно отклоняются от 180° (104–114°). Молекула H_2(O1w), хотя и образует водородную связь с карбонильным атомом O(3) карбоксильной группы C(4)–O(3) O(4), но очень слабую ($O(1_W)–H(2_W)\cdots O(3)$ 3,024 Å). Вторая группа молекулы воды $O(1_W)–H(1_W)$ образует контакт с атомом O(2) карбоксилатогруппы C(1)–O(1) O(2) с длиной связи 2,956 Å и углом связи 118°.

2. Карбоксилато-фторидные комплексные соединения уранила с тремя донорными центрами

Исследованы кристаллические структуры двух разнолигандных карбоксилато-фторидных комплексных соединений уранила – $Na_2[UO_2(C_5H_3NO_2)F_3]\cdot 4H_2O$ и $[(C(NH_2)_3]_4[UO_2)_2edtaF_4]$, в комплексных анионах которых содержатся три различных донорных центра: F, O и N.

2.1. $Na_2[UO_2(C_5H_3NO_2)\ F_3]\cdot 4H_2O$

Соединение $Na_2[UO_2(C_5H_3NO_2)\ F_3]\cdot 4H_2O$ образовано из катионов Na^+, дискретных комплексных анионов $[UO_2(C_5H_3NO_2)\ F_3]^{2-}$, имеющих пентагонально-бипирамидальную координационную геометрию, и решеточных молекул H_2O [12]. В комплексном анионе $[UO_2(C_5H_3NO_2)\ F_3]^{2-}$ группа UO_2^{2+} несколько отличается от линейной (∠ O(1)=U(1)=O(2) 175,75(17)°) с равными длинами связей U(1)=O(1) и U(1)=O(2): 1,791(5) и 1,793(5) Å. В экваториальной плоскости пентагонально-бипирамидального полиэдра гетероциклический пиколинатный лиганд $C_5H_3NO_2^-$ координирован атомом N гетероцикла и карбоксилатным атомом O(3) карбоксильной группы лиганда C(1)–O(3) O(4), образуя с атомом U пятичленный хелатный цикл. Оставшиеся три координационные позиции в экваториальной плоскости полиэдра заняты тремя терминальными атомами F, длины связей U–F которых лежат в диапазоне 2,234(4)–2,260(4) Å (ср. 2,247(4) Å). Они весьма сходны с длинами связи U–F в комплексных соединениях $M_3UO_2F_5$ (2,24 Å) [4], при этом дополнительный лиганд имеет небольшой эффект на силу связи атома фтора с атомом U(VI) в разнолигандном комплексе.

Координированный в экваториальной плоскости атом N удален от атома U на расстояние 2,596(5) Å, что сравнимо с длинами связей U–N (ср. 2,58 Å) в структуре монопиколинатного комплексного соединения уранила [13]. Длина связи U–O с карбоксилатным атомом O(3), координированным атомом урана в экваториальной плоскости полиэдра, равна 2,447(4) Å, что значительно больше, чем у соответствующей связи U–O в структуре [13] (ср. 2,34 Å).

Два сорта катионов Na^+ ($Na(1)^+$, $Na(2)^+$) в структуре $Na_2[UO_2(C_5H_3NO_2)\ F_3]\cdot 4H_2O$ имеют искаженную октаэдрическую геометрию. Катионы $Na(1)^+$ связаны с двумя атомами F и четырьмя атомами O молекул H_2O с расстояниями до них, изменяющимися от 2,307(5) до 2,462(5) Å. Катионы $Na(2)^+$ окружены одним атомом F и пятью атомами O, удаленными на расстояние 2,284(5)–2,654(6) Å.

Атомы водорода в молекулах H_2O не были локализованы. Однако наличие некоторых укороченных расстояний O···O и O···F позволяет предположить существование водородных связей в структуре.

2.2. $[C(NH_2)_3]_4[(UO_2)_2edtaF_4]$

Основу структуры $[C(NH_2)_3]_4[(UO_2)_2edtaF_4]$ составляют центросимметричные димерные комплексные анионы $[(UO_2)_2edtaF_4]^{4-}$ и катионы гуанидиния $[C(NH_2)_3]^+$ [14]. В комплексе $[(UO_2)_2edtaF_4]^{4-}$ анион $edta^{4-}$ выполняет роль гексадентатного мостика, образуя с каждым из двух связанных с ним ионов уранила по два глицинатных металлоцикла.

Координационный полиэдр атома U имеет пентагонально-бипирамидальную геометрию. В аксиальных вершинах пентагональной бипирамиды локализованы атомы O группы UO_2^{2+}, которая почти линейна (∠ O(4)=U(1)=O(5) 175,4(2)°) с длинами связей U(1)=O 1,781(4) и 1,814(4) Å соответственно. Экваториальная плоскость пентагональной бипирамиды образована двумя терминальными атомами F, двумя мостиковыми карбоксильными атомами O двух карбоксильных групп и атомом N мостикового аниона $edta^{4-}$. Длины терминальных связей U–F равны 2,198(3) и 2,200(4) Å. Мостиковые атомы O отстранены от атома U на расстояние 2,385(4) и 2,428(3) Å, а длина связи U–N составляет 2,656(4) Å, что несколько больше длины связи U–N (2,596(5) Å) в структуре $Na_2[UO_2(C_5H_3NO_2)\ F_3]\cdot 4H_2O$ [12].

В плоских катионах $[C(NH_2)_3]^+$ среднее расстояние C–N составляет 1,33 Å, валентные углы N–C–N близки к 120°. Группы N–H катионов $[(C(NH_2)_3]^+$ образуют с атомами F и карбонильными атомами O карбоксильных групп водородные связи, лежащие в диапазоне 2,782(6)–2,852(8) Å, стабилизирующие структуру.

3. Разнолигандные нейтральные фторидные комплексные соединения

UO_2F_2 образует комплексные соединения как с отрицательно заряженными, так и с нейтральными донорными лигандами. Исследованы кристаллические структуры ряда разнолигандных нейтральных фторидных комплексов UO_2F_2 с органическими производными фосфиноксида, а также с O-донорными лигандами-карбамидом и диметилсульфоксидом. Положительный заряд катиона UO_2^{2+} в исследованных разнолигандных комплексных соединениях с нейтральными O-донорными лигандами компенсируется анионами F^-.

В работе [15] описан синтез и исследование кристаллической структуры трех разнолигандных комплексных соединений уранила с фосфиноксидными лигандами, содержащими различные органические группы: $[\{UO_2(\mu\text{-}F)(TPPO)_3\}_2][BF_4]_2\cdot nC_6H_{14,}$ $[\{UO_2(\mu\text{-}F)(TBPO)_3\}_2][BF_4]_2$ и $[UO_2(\mu\text{-}F)(F)(DPPMO_2)]_2\cdot 2MeOH$ (TPPO – трифенилфосфин оксид, TBPO – три-*n*-бутилфосфиноксид, $DPPMO_2$ – бис(дифенилфосфиноксид) метана).

3.1. $[\{UO_2(\mu\text{-}F)(TPPO)_3\}_2][BF_4]_2\cdot nC_6H_{14}$

Соединение $[\{UO_2(\mu\text{-}F)(TPPO)_3\}_2][BF_4]_2\cdot nC_6H_{14}$ образовано комплексными катионами $[\{UO_2(\mu\text{-}F)(TPPO)_3\}_2]^{2+}$, анионами $[BF_4]^-$ и сольватными молекулами

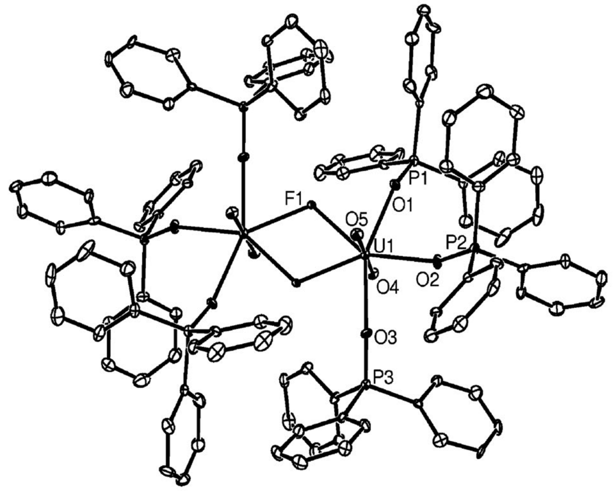


Рис. 4. Молекулярное строение димерного комплексного катиона $[\{UO_2(\mu\text{-}F)(TPPO)_3\}_2]^{2+}$ в структуре $[\{UO_2(\mu\text{-}F)(TPPO)_3\}_2][BF_4]_2 \cdot nC_6H_{14}$ [15]

C_6H_{14} [15]. В комплексном катионе атом U, имеющий пентагонально-бипирамидальное окружение, координирован двумя аксиальными атомами O, формирующими группу UO_2^{2+}, тремя атомами O трифенилфосфиноксидных групп и двумя мостиковыми ионами F^-, образующими экваториальную плоскость полиэдра. Обобществляя мостиковые атомы F^- экваториальной плоскости, координационные полиэдры атомов U образуют симметричные димеры $[\{UO_2(\mu\text{-}F)(TPPO)_3\}_2]^{2+}$ (рис. 4). Два некоординированных атомом U аниона $[BF_4]^-$ служат для компенсации заряда комплексного катиона.

В комплексном катионе $[\{UO_2(\mu\text{-}F)(TPPO)_3\}_2]^{2+}$ группы UO_2^{2+} линейны (∠ O(4)=U(1)=O(5) 179,8(2)°), длины связей U=O равны 1,766(4) и 1,778(4) Å. Расстояния U–F во фторидном мостике димера составляют 2,331(5) и 2,345(5) Å, а угол F(1)–U(1)-F(1′) равен 62,79(16)°. Длины связей $U–O_{TPPO}$ лежат в диапазоне 2,363(5)–2,389(6) Å (ср. 2,375 Å).

Некоординированные атомом U анионы $[BF_4]^-$ несколько искажены от тетраэдрической геометрии. Длины связей B–F в анионе изменяются в интервале 1,341(10)–1,379(10) Å. Сильное межатомное взаимодействие между атомами F анионов $[BF_4]^-$ и атомами H групп TPPO соседних молекул с расстояниями F–H 2,158(7) Å стабилизирует структуру.

3.2. $[\{UO_2(\mu\text{-}F)(TBPO)_3\}_2][BF_4]_2$

Кристаллическая структура комплексного соединения уранила $[\{UO_2(\mu\text{-}F)(TBPO)_3\}_2][BF_4]_2$ сходна со структурой $[\{UO_2(\mu\text{-}F)(TPPO)_3\}_2][BF_4]_2 \cdot nC_6H_{14}$ и отличается от последней, главным образом, заменой в катионе $[\{UO_2(\mu\text{-}F)(TPPO)_3\}_2]^{2+}$ в экваториальной координационной сфере группы UO_2^{2+} TPPO лигандов на три монодентатных TBPO лиганда и отсутствием сольватных молекул в структуре [15].

Длины связей U=O (1,764(3) и 1,777(3) Å) и угол связи (∠ O(4)=U(1)=O(5) 179,51(15)°) в группах UO_2^{2+} димерного комплексного катиона $[\{UO_2(\mu\text{-}F)(TBPO)_3\}_2]^{2+}$ такие же, как в катионе $[\{UO_2(\mu\text{-}F)(TPPO)_3\}_2]^{2+}$. Незначительно меньше расстояния $U–O_{TBPO}$ (2,352(3)–2,375(3) Å) в катионе $[\{UO_2(\mu\text{-}F)(TBPO)_3\}_2]^{2+}$ по сравнению с соответствующими расстояниями $U–O_{TPPO}$. Близкие значения имеют длины мостиковых связей U–F в обеих структурах. Как и в структуре $[\{UO_2(\mu\text{-}F)(TPPO)_3\}_2][BF_4]_2 \cdot nC_6H_{14}$, в структуре $[\{UO_2(\mu\text{-}F)(TBPO)_3\}_2][BF_4]_2$ анионы $[BF_4]^-$ несколько искажены от тетраэдрической геометрии. Средняя длина связи B–F в анионе $[BF_4]^-$ равна 1,368 Å.

3.3. $[UO_2(\mu\text{-}F)(F)(DPPMO_2)]_2 \cdot 2MeOH$

Соединение $[UO_2(\mu\text{-}F)(F)(DPPMO_2)]_2 \cdot 2MeOH$ является нейтральным комплексом уранила [15], проявляющим определенное сходство со структурами соединений $[\{UO_2(\mu\text{-F})(TPPO)_3\}_2][BF_4]_2\cdot nC_6H_{14}$ и $[\{UO_2(\mu\text{-F})(TBPO)_3\}_2][BF_4]_2$. Как в указанных соединениях, две пентагональные бипирамиды атомов U(VI) связаны двойным F– анионным мостиком в димер (рис. 5). Однако в димере $[UO_2(\mu\text{-F})(F)(DPPMO_2)]_2$ три экваториальные координационные позиции каждого атома U заняты бидентатным $DPPMO_2$ лигандом и монодентатным F^- анионом, тогда как в рассмотренных выше соединениях экваториальные координационные позиции заполнены тремя монодентатными P=O донорными фосфиноксидными лигандами. В структуре $[UO_2(\mu\text{-F})(F)(DPPMO_2)]_2\cdot 2MeOH$ содержатся сольватные молекулы MeOH.

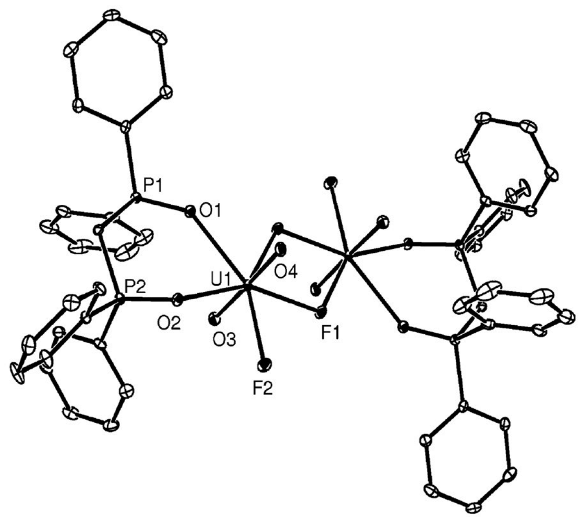


Рис. 5. Молекулярное строение димерного комплекса $[UO_2(\mu\text{-F})(F)(DPPMO_2)]_2$ в структуре $[UO_2(\mu\text{-F})(F)(DPPMO_2)]_2\cdot 2MeOH$ [15]

В димерном нейтральном комплексе $[UO_2(\mu\text{-F})(F)(DPPMO_2)]_2$ длины связей U=O в группе UO_2^{2+} имеют практически одинаковые значения (1,773(3)–1,771(3) Å), а угол связи O(3)=U(1)=O(4), равный 178,50(12)°, незначительно отличается от линейного. Терминальный атом F удален от атома U на расстояние 2,199(2) Å. Фторидные мостиковые связи в димерном комплексе почти симметричны и характеризуются значениями 2,319(2) и 2,326(2) Å. Связи $U\text{–}O_{DPPMO2}$ 2,417(3) и 2,420(2) Å весьма длинные по сравнению с аналогичными связями $U\text{–}O_{TPPO}$ и $U\text{–}O_{TBPO}$. На упаковку димерных комплексов в структуре, как и в рассмотренных выше структурах катион-анионных соединений, влияние оказывает межатомное взаимодействие F–H.

Синтез и кристаллическая структура ряда фосфиноксидных комплексных соединений уранила, в том числе двух разнолигандных комплексных соединений $[(UO_2(OPMePh_2)_3)_2(\mu\text{-F})_2][BF_4]_2\cdot 2CH_2Cl_2$ и $[(UO_2(dppmo)_2)_2(\mu\text{-F})][BF_4]_3$, описаны в работе [16].

3.4. $[(UO_2(OPMePh_2)_3)_2(\mu\text{-F})_2][BF_4]_2\cdot 2CH_2Cl_2$

Соединение $[(UO_2(OPMePh_2)_3)_2(\mu\text{-F})_2][BF_4]_2\cdot 2CH_2Cl_2$ имеет димерную структуру, сходную со структурой $[\{UO_2(\mu\text{-F})(TPPO)_3\}_2][BF_4]_2\cdot nC_6H_{14}$. Она составлена из димерных комплексных катионов $[(UO_2(OPMePh_2)_3)_2(\mu\text{-F})_2]^{2+}$, анионов BF_4^- и сольватных молекул CH_2Cl_2 [16]. В димерном катионе группы UO_2^{2+} координированы тремя терминальными фосфиноксидными донорными лигандами и двумя мостиковыми фторидными атомами, образующими экваториальную плоскость пентагонально-бипирамидального координационного полиэдра (рис. 6). Положительный заряд димерного катиона в структуре нейтрализуется анионами BF_4^-.

Длины связей U=O в группе UO_2^{2+} димерного катиона $[(UO_2(OPMePh_2)_3)_2(\mu\text{-F})_2]^{2+}$, равные 1,766(2) и 1,773(2) Å, совпадают с расстояниями U=O в димере $[\{UO_2(\mu\text{-F})(TPPO)_3\}_2]^{2+}$. Незначительно отличаются в них углы связи O(4)=U(1)=O(5) 178,69(10)° (по сравнению с 179,8(2)°). Одинаковые значения имеют длины связей $U\text{–}O_{P=O}$ в сравниваемых димерных катионных комплексах. Некоторое различие имеет место

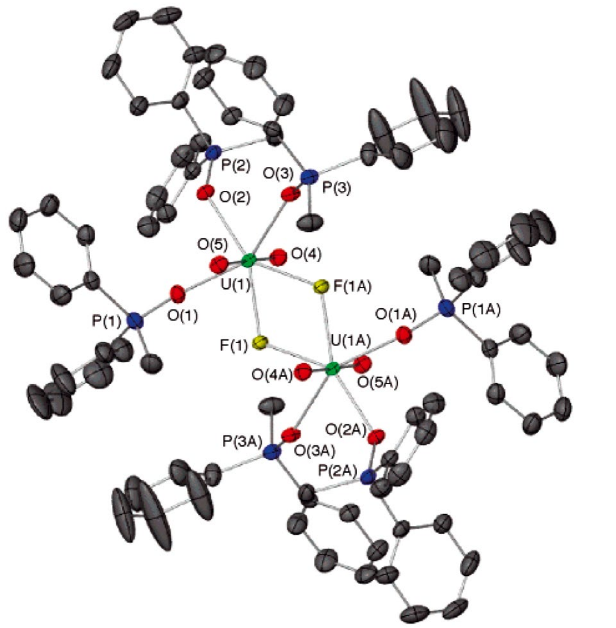


Рис. 6. Молекулярное строение димерного комплексного катиона $[(UO_2(OPMePh_2)_3)_2(\mu\text{-}F)_2]^{2+}$ в структуре $[(UO_2(OPMePh_2)_3)_2(\mu\text{-}F)_2][BF_4]_2 \cdot 2CH_2Cl_2$ [16]

лишь в длинах мостиковых фторидных связей, образующих димер, которые в $[(UO_2(OPMePh_2)_3)_2(\mu\text{-}F)_2]^{2+}$ менее симметричны (2,3122(17), 2,3480(17) Å) по сравнению с соответствующими длинами мостиковых связей U–F (2,331(5), 2,345(5) Å) в $[\{UO_2(\mu\text{-}F)(TPPO)_3\}_2]^{2+}$. Как и в структуре $[\{UO_2(\mu\text{-}F)(TPPO)_3\}_2][BF_4]_2 \cdot nC_6H_{14}$ [15], анионы $[BF_4]^-$ несколько искажены по сравнению с тетраэдрической геометрией. Длины связей B–F в анионе $[BF_4]^-$ находятся в диапазоне 1,377(5)–1,392(5) Å (ср. 1,382 Å), а углы связей F–B–F изменяются от 107,9(4) до 110,5(4) °.

3.5. $[(UO_2(dppmo)_2)_2(\mu\text{-}F)][BF_4]_3$

$[(UO_2(dppmo)_2)_2(\mu\text{-}F)][BF_4]_3$ является катионным-анионным комплексным соединением, составленным из комплексных катионов $[(UO_2(dppmo)_2)_2(\mu\text{-}F)]^{3+}$ и анионов $[BF_4]^-$. Катионы $[(UO_2(dppmo)_2)_2(\mu\text{-}F)]^{3+}$ образованы из групп $UO_2(dppmo)_2$ (dppmo –дифенилфосфинометана диоксид), объединенных одиночным F-мостиковым лигандом в димеры. Три аниона BF_4^- в структуре обеспечивают баланс заряда для двух групп $UO_2(dppmo)_2$ в каждом димере.

Соединение $[(UO_2(dppmo)_2)_2(\mu\text{-}F)][BF_4]_3$ получено в виде двух изомеров, обозначенных $\mathbf{4^C}$ and $\mathbf{4^B}$ соответственно. Оба изомера имеют одинаковую кристаллическую структуру. Структурные различия между изомерами $\mathbf{4^C}$ and $\mathbf{4^B}$ обусловлено различным характером координации лигандов dppmo в группах $UO_2(dppmo)_2$. В то время как в изомере $\mathbf{4^C}$ каждая группа UO_2^{2+} в димерном катионном комплексе $[(UO_2(dppmo)_2)_2(\mu\text{-}F)]^{3+}$ координирована двумя хелатирующими лигандами dppmo, что обеспечивает линейную геометрию мостиковой связи U–F–U,

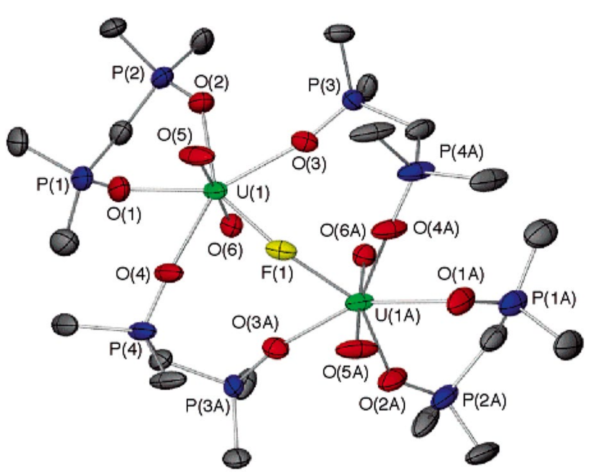


Рис. 7. Молекулярное строение димерного комплексного катиона $[(UO_2(dppmo)_2)_2(\mu\text{-}F)]^{3+}$ в структуре $[(UO_2(dppmo)_2)_2(\mu\text{-}F)][BF_4]_3$ [16]

в изомере $4^в$ один из двух лигандов dppmo в группе $UO_2(dppmo)_2$ димерного катиона мостиково накрест связан с двумя атомами U. Строение димерного катиона $[(UO_2(dppmo)_2)_2(\mu\text{-}F)]^{3+}$ в изомере $4^в$ соединения $[(UO_2(dppmo)_2)_2(\mu\text{-}F)][BF_4]_3$ представлено на рис. 7.

В незначительно отличающейся от линейности группе UO_2^{2+} в димерном катионе $[(UO_2(dppmo)_2)_2(\mu\text{-}F)]^{3+}$ (∠ O(5)=U(1)=O(6) 177,94(18)°) длины связей U=O составляют 1,774(3) и 1,775(3) Å. Симметрично расположенный в димере мостиковый атом F удален от атомов U на расстояние 2,3076(14) Å. Угол F(1)–U(1)–F(1A) равен 134,15(16)°. В группе $UO_2(dppmo)_2$ димерного катиона длины связей $U–O_{P=O}$ в бидентатно координированном атомом U лиганде dppmo значительно различаются и составляют 2,361(4) и 2,403(3) Å, что обусловлено присутствием в бидентатном лиганде между группами P(1)=O(1) и P(2)=O(2) группы CH_2. Во втором координированном лиганде dppmo группы $UO_2(dppmo)_2$, образующие накрест мостиковые связи $U–O_{P=O}$ с двумя атомами U, длины связей $U–O_{P=O}$ одинаковые и равны 2,363(3) и 2,369(3) Å. Средняя длина связи P=O в лигандах dppmo равна 1,492(3) Å. В слегка искаженных от тетраэдрической конфигурации анионах BF_4^- длины связей B–F составляют 1,297(10)–1,393(10) Å.

Соединение $[(UO_2(dppmo)_2)_2(\mu\text{-}F)][BF_4]_3$ является вторым известным структурно исследованным димерным фторидным комплексным соединением уранила (наряду с $K_5(UO_2)_2F_9$), в котором пентагонально-бипирамидальные группы объединены в димер одиночной фторидной мостиковой связью U–F–U.

3.6. $[UO_2F_2\{OC(NH_2)_2\}_2]_2$

Кристаллическая структура $[UO_2F_2\{OC(NH_2)_2\}_2]_2$ островная. Она построена из центросимметричных димерных молекулярных комплексов $[(UO_2)_2F_4\{OC(NH_2)_2\}_4]$, составленных из двух пентагональных бипирамид $UO_2F_3(ur)_2$, соединенных общим ребром F–F [17]. Координационный полиэдр атома U образован атомами кислорода уранильной группы, занимающими аксиальные позиции в бипирамиде, тремя атомами F, два из которых мостиковые, и двумя атомами кислорода координированных молекул карбамида. В экваториальной плоскости пентагональной бипирамиды координированные молекулы карбамида занимают цис-позиции.

Уранильные группы в димерном комплексе имеют практически линейное и симметричное строение (U=O 1,7146(2) и 1,7287(2) Å, ∠ O=U=O 178(1)°) и, как во всех комплексных фторидах уранида, ориентированы по нормали к экваториальной плоскости бипирамид. Длины мостиковых связей U–F равны 2,3586(3) и 2,3918(3) Å. Расстояние от атома U до терминального атома F существенно короче мостиковых связей U–F и составляет 2,2308(3) Å. Атомы O координированных молекул карбамида отстоят от центрального атома U на расстояние 2,3537(3) и 2,3586(3) Å. В димерном комплексе $[(UO_2)_2F_4\{OC(NH_2)_2\}_4]$ расстояние U–U равно 3,994 Å. Это расстояние является характерным для связи U–U в соединениях с общим фторидным ребром. В структуре $[UO_2F_2\{OC(NH_2)_2\}_2]_2$ димерные комплексы связаны между собой системой водородных связей N–H···F. Кратчайшее расстояние N···F в структуре составляет 2,815 Å.

3.7. $[UO_2F_2(CH_3)_2SO]$

Бесконечные зигзагообразные цепи содержатся в структуре комплексного соединения $[UO_2F_2(CH_3)_2SO]$ (UO_2F_2(dmso)) [18]. Атомы U в бесконечной цепи связаны двумя F–F мостиковыми связями. Каждый атом U имеет пентагонально-бипирамидальное окружение с двумя атомами O уранильной группы в апикальных позициях. Экваториальная плоскость бипирамиды образована четырьмя мостиковыми атомами F и атомом O(1) координированной молекулы dmso.

Практически линейная группа UO_2^{2+} (∠ O(2)=U=O(3) 179,47(1)°) с длинами связей U=O, равными 1,711(2) и 1,757(3) Å, перпендикулярна экваториальной плоскости пентагональной бипирамиды. Длины мостиковых связей U–F (2,308(3) × 2 и 2,341(3) × 2 Å) существенно не отличаются от таковых в структурах комплексных фторидов уранила с фторидными мостиковыми связями F–F [4]. Расстояние U–O(1) с атомом O молекулы dmso составляет 2,352(3) Å. Длина связи S(1)–O(1) в группе dmso равна 1,536(2) Å.

Заключение

В исследованных кристаллических структурах разнолигандных карбоксилато-фторидных комплексных соединений уранила атомы U(VI), как и в структурах фторидных комплексных соединений [4], имеют пентагонально-бипирамидальную координационную геометрию. Лишь в структурах трех разнолигандных карбоксилато-фторидных комплексных соединений уранила $[UO_2F(C_5H_6O_4)]\cdot 2H_2O$ [6], $Ba_2[(UO_2)_3(suc)_3F_4]\cdot 5H_2O$ и $Ba[(UO_2)_2(glt)_2(Hglt)F]\cdot 8H_2O$ [5] установлено образование гексагонально-бипирамидальных полиэдров $[UO_6F_2]$, в которых экваториальные координационные позиции вокруг атома U заняты двумя фторидными и четырьмя карбоксилатными оксидными лигандами.

Структурными единицами разнолигандных карбоксилато-фторидных комплексных соединений уранила являются группы $UO_2F_nO_{5-n}$ (n = 1–4). В структурах разнолигандных карбоксилато-фторидных комплексных соединений уранила атомы F являются преимущественно мостиковыми лигандами. Изолированные одномерные разнолигандные комплексные анионы $[UO_2F_3(C_2O_4)]^{3-}$ (группа $UO_2F_3O_2$) содержатся в кристаллической структуре $Na_3[UO_2F_3(C_2O_4)]\cdot 6H_2O$ [9]. В структурах разнолигандных карбоксилато-фторидных комплексных соединений уранила группы $UO_2F_nO_{5-n}$ посредством общих фторидных вершин и/или общих F–F ребер объединяются в димеры и полимерные цепи, которые сопутствующими карбоксилатными лигандами объединяются в бесконечные слои. Лишь в структуре разнолигандного карбоксилато-фторидного комплексного соединения уранила $Na_4[(UO_2)_2(OCH_2COO)_2F_4]\cdot 6H_2O$ [8] содержатся дискретные димерные комплексы $[(UO_2)(OCH_2COO)F_2]_2$, общее экваториальное ребро каждого димера образовано не мостиковыми атомами F–F, как в структурах фторидных [4] и разнолигандных неорганических фторидных комплексных соединений уранила [1], а мостиковыми атомами O–O′ депротонированных гидроксильных групп глюколатных лигандов [8].

В структуре разнолигандного фторидного комплексного соединения уранила $[(UO_2(dppmo)_2)_2(\mu\text{-}F)][BF_4]_3$ [16] димерные катионы $[(UO_2(dppmo)_2)_2(\mu\text{-}F)]^{3+}$ образованы из групп $UO_2(dppmo)_2$ (dppmo – дифенилфосфинометана диоксид) не двойными F–F мостиковыми связями, как в димерных группах фторидных соединений, а одиночным F мостиковым лигандом. Соединение $[(UO_2(dppmo)_2)_2(\mu\text{-}F)][BF_4]_3$ является вторым известным структурно исследованным димерным фторидным комплексным соединением уранила (наряду с $K_5(UO_2)_2F_9$), в котором пентагонально-бипирамидальные группы объединены в димер одиночной фторидной мостиковой связью U–F–U.

Исследованы кристаллические структуры двух разнолигандных карбоксилато-фторидных комплексных соединений уранила $Na_2[UO_2(C_5H_3NO_2)\ F_3]\cdot 4(H_2O)$ и $[C(NH_2)_3]_4[(UO_2)_2edtaF_4]$, в комплексных анионах которых содержатся три различных донорных центра: F, O и N.

Структурно исследован ряд разнолигандных комплексных соединений UO_2F_2 с нейтральными донорными лигандами – органическими производными фосфиноксида, а также с карбамидом и диметилсульфоксидом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Давидович Р.Л. Структурная химия разнолигандных неорганических фторидных комплексных соединений уранила (обзор) // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 1. С. 92–112.
2. Kim J.-Y., Norquist A.J., O'Hare D. Variable dimensionality in the $UO_2(CH_3CO_2)_2{\cdot}2H_2O$/HF/isonicotinic acid system: Synthesis and structures of zero-, one-, and two-dimensional uranium isonicotinates // Chem. Mater. 2003. Vol. 15. P. 1970–1975. https://doi.org/10.1021/cm021722n.
3. Andreev G., Budantseva N., Fedoseev A. Interaction with simple monopyridinecarboxylic ligands revealing unexpected structural types of uranyl halides // Inorg. Chem. 2020. Vol. 59. P. 15583–15586. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.0c02718.
4. Davidovich R.L., Goreshnik E.A. Structural chemistry of fluoride complexes of uranyl // Struct. Chem. 2023. Vol. 34, N1. P. 265–284. https://doi.org/10.1007/s11224–022–02095–8.
5. Сережкин В.Н., Григорьев М.С., Сукачева М.В., Сережкина Л.Б. Новые фторосукцинато- и фтороглутаратоуранилаты бария // Журн. физ. химии. 2023. Т. 97, № 4. С. 535–542. DOI: 10.31857/S0044453723040283.
6. Kim J.-Y., Norquist A.J., O'Hare D. Incorporation of uranium(VI) into metal–organic framework solids, $[UO_2(C_4H_4O_4)]{\cdot}H_2O$, $[UO_2F(C_5H_6O_4)]{\cdot}2H_2O$, and $[(UO_2)_{1.5}(C_8H_4O_4)_2]_2[(CH_3)_2NCOH_2]{\cdot}H_2O$ // Dalton Trans. 2003. N14. P. 2813–2814. https://doi.org/10.1039/B306733P.
7. Zhang Y.-J., Tilley G.J., Martin L.R., Livens C.D., Helliwell M., Abdul Malik K.M., Hursthouse M.B. Controlling solid state structure of uranyl(VI) complexes: Monomeric complexes with malonate and malonamate // J. Nucl. Sci. Tech. 2002. Vol. 39, suppl. 3. P. 457–460. DOI: 10.1080/00223131.2002.10875506.
8. Farkas I., Csöregh I., Szabó Z. Crystal Structure of the Sodium Salt of the Uranyl-Oxyacetate-Fluoride Dimer, $Na_4(UO_2)_2(OCH_2COO)_2F_4{\cdot}6H_2O$ // Acta Chem. Scand. 1999. Vol. 53. P. 1009–1012. DOI: 10.3891/acta.chem.scand.53–1009.
9. Nguyen Quy Dao, Bkouche-Waksman I., Walewski M., Caceres D. Etude cristallographique et structurale des complexes oxalato-fluorure d′uranyle alcalins de formules $M_3UO_2F_3(C_2O_4)$-nH_2O et $M_3UO_2F(C_2O_4)_2$-$n'H_2O$ // Bull. Soc. Chim. Fr. 1984. N3–4. P. I.129–I.132.
10. Kerr A.T., Kumalah S.A., Holman K.T., Butcher R.J., Cahill C.L. Uranyl coordination polymers incorporating η^5-cyclopentadienyliron-functionalized η^6-phthalate metalloligands: Syntheses, structures and photophysical properties // J. Inorg. Organomet. Polym. 2014. Vol. 24. P. 128–136. DOI: 10.1007/s10904–013–9980–0.
11. Hou X., Tang S.-F. Two new two-dimensional layered uranyl-bearing polycarboxylates from semi-rigid tetracarboxylic acids // RSC Adv. 2014. Vol. 4. P. 34716–34720. DOI: 10.1039/c4ra04684f.
12. Aas W., Johanson M.H. Structure of the sodium salt of the ternary uranyl-picolinate-fluoride complex $[UO_2(\text{picolinate})F_3]\ Na_2(H_2O)_4$ // Acta Chem. Scand. 1999. Vol. 53. P. 581–583. DOI: 10.3891/acta. chem. scand. 53–0581.
13. Silverwood P.R., Collison D., Livens F.R., Beddoes R.L., Taylor R.J. Uranyl monopicolinate complexes // J. Alloys Comp. 1998. Vol. 271–273. P. 180–183. https://doi.org/10.1016/S0925-8388(98)00050-4.
14. Щелоков Р.Н., Орлова И.М., Сергеев А.В., Михайлов Ю.Н., Лобанова Г.М., Канищева А.С. Смешанные соединения уранила с мостиковой этилендиаминтетраацетатогруппой // Коорд. химия. 1985. Т. 11, № 2. С. 196–206.
15. John G.H., May I., Collison D., Helliwell M. Synthesis, structural and spectroscopic characterisation of three di-μ-fluoro-bis[dioxouranyl] complexes // Polyhedron. 2004. Vol. 23. P. 3097–3103. https://doi.org/10.1016/j.poly.2004.09.010.
16. Kannan S., Moody M.A., Barnes C.L., Duval P.B. Fluoride abstraction and reversible photochemical reduction of cationic uranyl(VI) phosphine oxide complexes // Inorg. Chem. 2006. Vol. 45. P. 9206–9212. https://doi.org/10.1021/ic060742e.
17. Михайлов Ю.Н., Иванов С.Б., Орлова И.М., Поднебесная Г.В., Кузнецов В.Г., Щелоков Р.Н. Синтез и кристаллическая структура тетракарбамидотетрафтородиуранила $[UO_2F_2\{OC(NH_2)_2\}_2]_2$ // Коорд. химия. 1976. Т. 2, № 11. С. 1570–1573.
18. Dewan J.C., Edwards A.J., Slim D.R., Guerchais J.E., Kergoat R. Fluoride Crystal Structures. Part XXIII. *catena*-Di-μ-fluoro-(dimethyl sulphoxide) dioxouranium (VI) // J. Chem. Soc. Dalton Trans. 1975. Iss. 21. P. 2171–2174.

REFERENCES

1. Davidovich R.L. Strukturnaya khimiya raznoligandnykh neorganicheskikh ftoridnykh kompleksnykh soedinenii uranila (obzor) = [Structural chemistry of mixed-ligand inorganic fluoride complexes of uranyl]. *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(1):92–112. (In Russ.).
2. Kim J.-Y., Norquist A.J., O'Hare D. Variable dimensionality in the $UO_2(CH_3CO_2)_2{\cdot}2H_2O$/HF/isonicotinic acid system: Synthesis and structures of zero-, one-, and two-dimensional uranium isonicotinates. *Chem. Mater.* 2003;15:1970–1975. https://doi.org/10.1021/cm021722n.

3. Andreev G., Budantseva N., Fedoseev A. Interaction with simple monopyridinecarboxylic ligands revealing unexpected structural types of uranyl halides. *Inorg. Chem.* 2020;59:15583–15586. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.0c02718.

4. Davidovich R.L., Goreshnik E.A. Structural chemistry of fluoride complexes of uranyl. *Struct. Chem.* 2023;34(1):265–284. https://doi.org/10.1007/s11224-022-02095-8.

5. Serezhkin V.N., Grigoriev M.S., Sukacheva M.V., Serezhkina L.B. New barium fluorosuccinato- and fluoroglutaratouranylates. *Russ. J. Phys. Chem.* 2023;97(4):695–701. DOI: 10.31857/S0044453723040283.

6. Kim J.-Y., Norquist A.J., O'Hare D. Incorporation of uranium(VI) into metal–organic framework solids, $[UO_2(C_4H_4O_4)]\cdot H_2O$, $[UO_2F(C_5H_6O_4)]\cdot 2H_2O$, and $[(UO_2)_{1.5}(C_8H_4O_4)_2]_2[(CH_3)_2NCOH_2]\cdot H_2O$. *Dalton Trans.* 2003;14:2813–2814. https://doi.org/10.1039/B306733P.

7. Zhang Y.-J., Tilley G.J., Martin L.R., Livens C.D., Helliwell M., Abdul Malik K.M., Hursthouse M.B. Controlling solid state structure of uranyl(VI) complexes: Monomeric Complexes with malonate and malonamate. *J. Nucl. Sci. Tech.* 2002;39(suppl. 3):457–460. DOI: 10.1080/00223131.2002.10875506.

8. Farkas I., Csöregh I., Szabó Z. Crystal Structure of the Sodium Salt of the Uranyl-Oxyacetate-Fluoride Dimer, $Na_4(UO_2)_2(OCH_2COO)_2F_4\cdot 6H_2O$. *Acta Chem. Scand.* 1999;53:1009–1012. DOI: 10.3891/acta.chem.scand.53–1009.

9. Nguyen Quy Dao, Bkouche-Waksman I., Walewski M., Caceres D. Etude cristallographique et structurale des complexes oxalato-fluorure d'uranyle alcalins de formules $M_3UO_2F_3(C_2O_4)$-nH_2O et $M_3UO_2F(C_2O_4)_2$-n′H_2O. *Bull. Soc. Chim. Fr.* 1984;(3–4): I.129-I.132.

10. Kerr A.T., Kumalah S.A., Holman K.T., Butcher R.J., Cahill C.L. Uranyl coordination polymers incorporating η^5-cyclopentadienyliron-functionalized η^6-phthalate metalloligands: Syntheses, structures and photophysical properties. *J. Inorg. Organomet. Polym.* 2014;24:128–136. DOI: 10.1007/s10904-013-9980-0.

11. Hou X., Tang S.-F. Two new two-dimensional layered uranyl-bearing polycarboxylates from semi-rigid tetracarboxylic acids. *RSC Adv.* 2014;4:34716–34720. DOI: 10.1039/c4ra04684f.

12. Aas W., Johanson M.H. Structure of the sodium salt of the ternary uranyl-picolinate-fluoride complex $[UO_2(\text{picolinate})F_3]$ $Na_2(H_2O)_4$. *Acta Chem. Scand.* 1999;53:581–583. DOI: 10.3891/acta. chem. scand. 53–0581.

13. Silverwood P.R., Collison D., Livens F.R., Beddoes R.L., Taylor R.J. Uranyl monopicolinate complexes. *J. Alloys Comp.* 1998;271–273:180–183. https://doi.org/10.1016/S0925-8388(98)00050-4.

14. Shchelokov R.N., Orlova I.M., Sergeev A.V., Mikhailov Yu.N., Lobanova G.M., Kanishcheva A.S. Smeshannye soedinenya uranila s mostikovoi etilendiamintetraatsetatogruppoi = [Mixed uranyl compounds with bridging EDTA group]. *Koord. khim.* 1985;11(2):196–206. (In Russ.).

15. John G.H., May I., Collison D., Helliwell M. Synthesis, structural and spectroscopic characterisation of three di-μ-fluoro-bis[dioxouranyl] complexes. *Polyhedron*. 2004;23:3097–3103. https://doi.org/10.1016/j.poly.2004.09.010.

16. Kannan S., Moody M.A., Barnes C.L., Duval P.B. Fluoride abstraction and reversible photochemical reduction of cationic uranyl (VI) phosphine oxide complexes. *Inorg. Chem.* 2006;45:9206–9212. https://doi.org/10.1021/ic060742e.

17. Mikhailov Yu.N., Ivanov S.B., Orlova I.M., Podnebesnova G.V., Kuznetsov V.G., Shchelokov R.N. Sintez i kristallicheskaya struktura tetrakarbamidotetraftorodiuranila $[UO_2F_2\{CO(NH_2)_2\}_2]_2$ = [Synthesis and crystal structure of tetracarbamidotetrafluoridodiyranyl $[UO_2F_2\{CO(NH_2)_2\}_2]_2$. *Koord. khim.* 1976;2(11):1570–1573. (In Russ.).

18. Dewan J.C., Edwards A.J., Slim D.R., Guerchais J.E., Kergoat R. Fluoride Crystal Structures. Pt XXIII. *catena*-di-μ-fluoro-(dimethyl sulphoxide)dioxouranium(VI). *J. Chem. Soc. Dalton Trans.* 1975;(21):2171–2174.

Научная статья
УДК 547.458.88+544.723+546.81+613.6
DOI: 10.31857/S0869769824020168
EDN: lciway

Исследование адсорбционной способности некоторых пектинсодержащих продуктов питания и яблочного пектина по отношению к соединениям свинца с аминокислотами *in vitro*

И.Л. Тихонова✉, Н.А. Белоконова, Г.М. Насыбуллина

Ирина Леонидовна Тихонова
кандидат химических наук
Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Россия
koritca14@gmail.com
https://orcid.org/0009-0004-9287-2451

Надежда Анатольевна Белоконова
доктор технических наук, кандидат химических наук, доцент
Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Россия
89221503087@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-0198-3016

Галия Максутовна Насыбуллина
доктор медицинских наук, профессор
Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Россия
gdp43@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-7513-5741

Аннотация. Свинец является одним из самых распространенных и опасных токсикантов для организма человека. Комплексообразующая способность ионов свинца со многими незаменимыми и заменимыми аминокислотами вызывает дисбаланс аминокислотного фонда организма человека и животных. Установлено, что наиболее эффективными сорбентами и веществами, связывающими ионы свинца, являются пектины. Вместе с тем остается актуальной задача по поиску наиболее эффективных комплексов биологически активных веществ, обеспечивающих повышение резистентности организма в условиях воздействия свинца и его соединений. В данном исследовании в качестве источника пектинсодержащих веществ выбрали продукты питания с известным и достаточно высоким процентом содержания пектиновых веществ: морковь и белокочанную капусту, а также яблочный пектин (БАД). Поскольку мясо рыбы является наиболее распространенным источником попадания свинца в организм человека, выбирали аминокислоты для исследования, исходя из известного аминокислотного состава рыб. Проведенное исследование подтвердило более ранние данные о способности пектиновых веществ адсорбировать свинец. Было показано, что процесс адсорбции ионов свинца в присутствии аминокислот происходит более активно на цельном продукте, причем прошедшем термическую обработку, нежели на яблочном пектине в виде БАДа. Установлено, что адсорбционная способность моркови и капусты значительно выше по сравнению с яблочным пектином, что связано с адсорбцией клетчатки, входящей в состав овощей. Данные результаты свидетельствуют о перспективности разработки или корректировки направленных рационов питания для населения, проживающего на экологически неблагополучных территориях, или работающих во вредных условиях труда.

Ключевые слова: адсорбция, пектины, свинец, аминокислоты, комплексные соединения, детоксиканты, лечебно-профилактическое питание

Для цитирования: Тихонова И.Л., Белоконова Н.А., Насыбуллина Г.М. Исследование адсорбционной способности некоторых пектинсодержащих продуктов питания и яблочного пектина по отношению к соединениям свинца с аминокислотами *in vitro* // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 2. С. 187–198. http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020168, EDN: lciway

Original article

Investigation of the adsorption capacity of some pectin-containing foods and apple pectin in relation to lead compounds with amino acids *in vitro*

I.L. Tikhonova, N.A. Belokonova, G.M. Nasybullina

Irina L. Tikhonova
Candidate of Sciences in Chemistry
Ural State Medical University, Yekaterinburg, Russia
koritca14@gmail.com
https://orcid.org/0009-0004-9287-2451

Nadezhda A. Belokonova
Doctor of Sciences in Technique, Candidate of Sciences in Chemistry, Associate Professor
Ural State Medical University, Yekaterinburg, Russia
89221503087@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-0198-3016

Galiya M. Nasybullina
Doctor of Sciences in Medicine, Professor
Ural State Medical University, Yekaterinburg, Russia
gdp43@yandex.ru.
https://orcid.org/0000-0001-7513-5741

Abstract. Lead is one of the most common and dangerous toxicants for the human body. It was revealed that the lead content in some cases exceeds the hygienic standards established for food products. The complexing ability of lead ions with many essential and non-essential amino acids has been established, which causes an imbalance in the amino acid pool of the human and animal body. It has been established that the most effective sorbents and substances that bind lead ions are pectins. At the same time, the task of finding the most effective complexes of biologically active substances that increase the body's resistance under conditions of exposure to lead and its compounds remains urgent. In this study, food products with a known and fairly high percentage of pectin substances were chosen as a source of pectin-containing substances: carrots and white cabbage, as well as apple pectin (dietary supplement). Since fish meat is one of the most common sources of lead entering the human body, amino acids for the study were selected based on the known amino acid composition of fish. The study confirmed previously known data on the ability of pectin substances to adsorb lead. At the same time, it was shown that the process of adsorption of lead ions in the presence of amino acids occurs more actively on the whole product, which has undergone heat treatment, than on apple pectin in the form of a dietary supplement. It was found that the adsorption capacity of carrots and cabbage is significantly higher compared to apple pectin, which is associated with adsorption by fiber, which is part of the vegetables. These results indicate the prospects of developing or adjusting targeted diets for the population living in environmentally unfavorable areas or working in hazardous working conditions.

Keywords: adsorption, pectins, lead, amino acids, complex compounds, detoxicants, therapeutic and preventive nutrition

For citation: Tikhonova I.L., Belokonova N.A., Nasybullina G.M. Investigation of the adsorption capacity of some pectin-containing foods and apple pectin in relation to lead compounds with amino acids *in vitro*. *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(2):187–198. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020168, EDN: lciway

Введение

Свинец является одним из самых распространенных и опасных токсикантов для организма человека и поражает кроветворную, нервную, пищеварительную, репродуктивную и другие системы. Такое воздействие обусловлено его способностью приводить организм к окислительному стрессу, образовывать комплексы с лигандами, содержащими сульфгидрильные и карбоксильные группы, снижать активность ферментов. Ионы свинца конкурентно ингибируют ионы кальция, магния, железа и др. [1, 2]. Установлена комплексообразующая способность ионов свинца со многими незаменимыми и заменимыми аминокислотами [3–5], что вызывает дисбаланс аминокислотного фонда организма человека и животных [5].

Известны и пути попадания свинца в организм человека: в ходе профессиональной деятельности – преимущественно ингаляционным путем, поскольку свинец применяется во многих отраслях промышленного производства и добычи [2]; большая часть попадает вместе с продуктами питания и водой [2, 6, 7]; в небольшом количестве – через кожные покровы при непосредственном контакте с соединениями металла [8].

Среднее содержание свинца в продуктах питания 0,2 мг/кг, по отдельным группам, мг/кг (в скобках – среднее содержание): фрукты – 0,01–0,60 (0,10); овощи – 0,02–1,60 (0,19); крупы – 0,03–3,00 (0,21); хлебобулочные изделия – 0,03–0,82 (0,16); мясо и рыба – 0,01–0,78 (0,16); молоко – 0,01–0,10 (0,027); в питьевой воде отмечается от 0,05 до 0,2 мг/л [6, 7].

Экспериментально доказаны факты аккумуляции свинца растениями, произрастающими на загрязненных почвах. Концентрация свинца в таких растениях может превышать допустимые значения от 2 до 100 раз[1]. Достаточно подробно исследованы особенности накопления свинца в органах и тканях рыб различных семейств в зависимости от антропогенного воздействия. Выявлено, что содержание свинца в ряде случаев превышает гигиенические нормативы, установленные для пищевых продуктов. Накопление свинца происходит в разных органах рыб, в том числе костях и мышцах [9–13]. В регионах размещения предприятий цветной металлургии свинец относится к приоритетным загрязнителям воздуха, питьевой воды и продуктов питания местного производства [14, 15].

В связи с актуальностью проблемы имеется большое количество публикаций, направленных на исследование адсорбционных свойств различных веществ по отношению

[1] Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Свердловской области в 2021 году» / Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Свердловской области. 2022. (http://www.66.rospotrebnadzor.ru).

к ионам свинца. Установлено, что наиболее эффективными сорбентами и веществами, связывающими ионы свинца, являются пектины [1, 16–19].

Пектины (пектиновые вещества, ПВ) – это группа высокомолекулярных полисахаридов, входящих в состав клеточных стенок и межклеточных образований растений наряду с целлюлозой (клетчаткой), гемицеллюлозой, лигнином. Пектиновые вещества встречаются во всех частях растений: в корнях, стеблях, соцветиях, листьях и главным образом в плодах и овощах.

В работах [20–22] было доказано, что пектины обладают более высокой адсорбирующей способностью, чем целлюлоза (клетчатка), и способны к выведению из организма токсичных веществ, радионуклидов, тяжелых металлов. Пектаты металлов, образуемые при взаимодействии полисахаридов с солями тяжелых металлов, являются нерастворимыми соединениями. Они не способны к адсорбции в кишечнике и поэтому покидают его вместе с токсическими ионами [19].

Экспериментальным образом определено содержание пектиновых веществ в таких овощах и фруктах: морковь – 0,6–1,6 г/100 г, капуста – 0,3–0,6 г/100 г, яблоко – 1,0 г/100 г [23, 24]. Поскольку в яблоках содержание пектиновых веществ наиболее высокое, их чаще используют в качестве сырья для изготовления пектинсодержащих БАДов.

Практический интерес представляют естественные продукты питания, источники ПВ, которые целесообразно использовать для снижения экологического или профессионального риска как в виде биологически активных добавок к пище, так и за счет оптимизации рационов питания [25–27].

В медицине труда лицам, работающим в условиях воздействия свинца и его соединений, назначают рацион лечебно-профилактического питания, включающий 2 г пектина в составе обогащенных им продуктов питания или соков с мякотью, и блюда из овощей, не подвергнутых термической обработке[2]. С целью повышения устойчивости отдельных категорий граждан, проживающих на территориях, загрязненных свинцом, обосновано включение биопрофилактических комплексов, содержащих пектин [28]. Вместе с тем остается актуальной задача по поиску наиболее эффективных комплексов биологически активных веществ, обеспечивающих повышение резистентности организма в условиях воздействия свинца и его соединений. Возможно, что специально созданные рационы питания будут более эффективными по сравнению с готовыми лекарственными формами биологически активных веществ. При этом значение имеет не только отбор продуктов, содержащих наиболее высокие концентрации биологически активных веществ, но и способы их технологической переработки. Все это является перспективным направлением междисциплинарных исследований.

Цель данного исследования – оценить адсорбционную способность моркови и капусты белокочанной по отношению к соединениям свинца с аминокислотами и сопоставить с адсорбционной активностью яблочного пектина.

---

[2] Приказ Минздравсоцразвития России № 45н от 16 февраля 2009 г. «Об утверждении норм и условий бесплатной выдачи работникам, занятым на работах с вредными условиями труда, молока или других равноценных пищевых продуктов, Порядка осуществления компенсационной выплаты в размере, эквивалентном стоимости молока или других равноценных пищевых продуктов, и Перечня вредных производственных факторов, при воздействии которых в профилактических целях рекомендуется употребление молока или других равноценных пищевых продуктов». (https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=155863); Приказ Минздравсоцразвития России № 46н от 16 февраля 2009 г. «Об утверждении Перечня производств, профессий и должностей, работа в которых дает право на бесплатное получение лечебно-профилактического питания в связи с особо вредными условиями труда, рационов лечебно-профилактического питания, норм бесплатной выдачи витаминных препаратов и Правил бесплатной выдачи лечебно-профилактического питания» (https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=332418).

Материалы и методы

Для приготовления растворов ацетата свинца с концентрациями 0,00125, 0,0025, 0,005 моль/л был взят свинец уксуснокислый 99,50% квалификации «ч.д.а.» $(CH_3COO)_2Pb\times3H_2O$ («НеваРеактив»). Для приготовления растворов аминокислот использовались аргинин, глицин, глутамин, глутаминовая кислота, фенилаланин квалификации «ч.д.а» и «ч» («ЛенРеактив»).

Объектами эксперимента были морковь сорта Нантская 4, белокочанная капуста сорта Слава, яблочный пектин без добавок (БАД «Яблочный пектин», компания «Оргтиум», Москва).

Адсорбцию проводили на сырых и термически обработанных овощах. Овощи предварительно мыли, измельчали при помощи овощерезки на мелкие кусочки. Термическая обработка проводилась в небольшом количестве дистиллированной воды при температуре 100 ºС в течение 20 мин.

Условия проведения адсорбции: к растворам ацетата свинца указанных концентраций, взятых в соотношении 1:1 с разными аминокислотами (АК) (объем аликвоты 20 мл), добавляли 5 г измельченного овоща и определяли содержание катиона металла по истечении 20, 40, 60 мин. Аналогичным образом, к 0,5 г яблочного пектина (БАД) добавляли растворы ацетата свинца указанных концентраций с разными АК.

Для определения концентрации ионов свинца до и после адсорбции использовали трилонометрический метод с индикатором (ксиленоловый оранжевый) в среде ацетатного буфера (pH = 5,5). Растворы Трилона Б готовили из фиксанала с концентрацией $C^{Э} = 0{,}1$ н («ЛенРеактив»).

По полученным экспериментальным данным рассчитали адсорбцию ионов свинца, выраженную в мг/г, по формуле:

$$\Gamma = \left[\left(C_1 - C_2\right) \times Va \times A\left(\mathrm{Pb}\right) \times 1000\right] / \, m,$$

где C_1 – молярная концентрация ионов свинца до адсорбции, моль/л; C_2 – молярная концентрация ионов свинца после адсорбции, моль/л; Va – объем аликвоты; A(Pb) – атомная масса свинца, г/моль; m – масса адсорбента, г.

Для оценки адсорбционной способности использовали показатель – степень извлечения ионов, в% (степень адсорбции). Расчет проводили по формуле:

$$\omega = \left[\left(C_1 - C_2\right) / \, C_1\right] \times 100,$$

где C_1 – молярная концентрация ионов свинца до адсорбции, моль/л; C_2 – молярная концентрация ионов свинца после адсорбции, моль/л.

Полученные результаты были обработаны статистически в программе Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

В публикациях исследована адсорбционная способность пектиновых веществ, выделенных из разных растений по отношению к ионам свинца из растворов с достаточно высокой концентрацией – 0,035 моль/л (7,25 г/л) [19]. Нами были исследованы водные растворы ацетата свинца с достаточно низкими концентрациями, соизмеримыми с риском поступления ионов свинца на химических производствах. Мольное соотношение свинца с аминокислотами составляло 1:1, так как имеются данные, что в растворах с мольными соотношениями 1:1 и 1:2 образуются комплексные соединения свинца с АК [29].

Поскольку мясо рыбы является наиболее распространенным источником попадания свинца в организм человека [9–13], выбирали АК для исследования, исходя из известного аминокислотного состава рыб [30]:

– нейтральные (глицин, фенилаланин, глутамин),
– кислые (глутаминовая кислота),
– основные (аргинин).

Авторами [31] была определена устойчивость комплексных соединений АК с ионами Pb(II), Hg(II) и Cd(II) и доказано, что наиболее устойчивые комплексные соединения образуют АК с ионами Pb(II) за счет координации через атомы азота аминогруппы и кислорода карбоксильных групп с образованием 2 пятичленных циклов.

В качестве источника пектинсодержащих веществ выбрали такие продукты питания, для которых известен процент содержания данных веществ: морковь и белокочанную капусту, где этот процент достаточно высок (1,62% – в моркови, 0,56% – в капусте белокочанной) [23, 24].

Яблочный пектин (БАД) – коммерческий пектин содержит пектиновые вещества с молекулярной массой около 85 000 г/моль [22]. Имеются данные о том, что пектины с разной молекулярной массой характеризуются способностью быстро и эффективно связывать ионы свинца, причем свинецсвязывающая активность возрастает прямо пропорционально снижению молекулярной массы пектина. При термической обработке вследствие гидролиза уменьшается молекулярная масса пектиновых веществ [22].

На рис. 1 представлены данные по адсорбции ионов свинца на термически обработанной моркови из растворов, содержащих ионы свинца исследуемых концентраций отдельно и совместно с фенилаланином в соотношении 1:1. Степень адсорбции наибольшая в растворах с минимальным содержанием ионов свинца совместно с фенилаланином.

Из данных, представленных на рис. 2, следует, что степень адсорбции ионов свинца целесообразно оценивать через 60 мин.

Экспериментальные данные по адсорбции ионов свинца сырыми и термически обработанными овощами из растворов, содержащих различные АК, приведены на рис. 3.

Из представленных данных видно, что достаточно высокую адсорбционную способность имеет морковь в сыром и вареном виде, что может быть обусловлено повышенным содержанием пектиновых веществ в ней в сравнении с капустой. Это согласуется и с данными авторов [24]. Адсорбционная способность термически обработанных овощей была выше для всех АК и растворов ионов свинца. При термической обработке

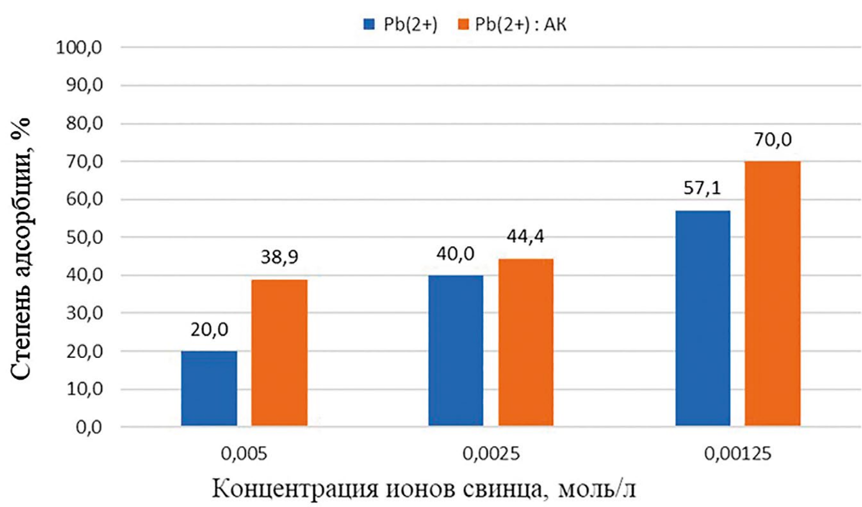


Рис. 1. Степень адсорбции ионов свинца (в %) на моркови отварной из растворов, содержащих ионы свинца различных концентраций отдельно и совместно с фенилаланином, через 60 мин

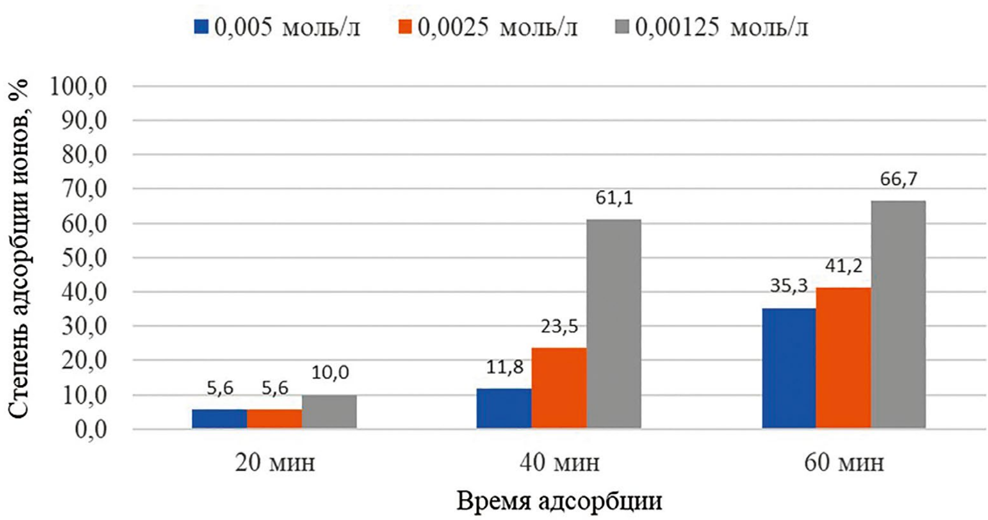


Рис. 2. Степень адсорбции ионов свинца (в %) из растворов, содержащих фенилаланин, в зависимости от концентрации свинца в растворе и времени адсорбции на моркови отварной

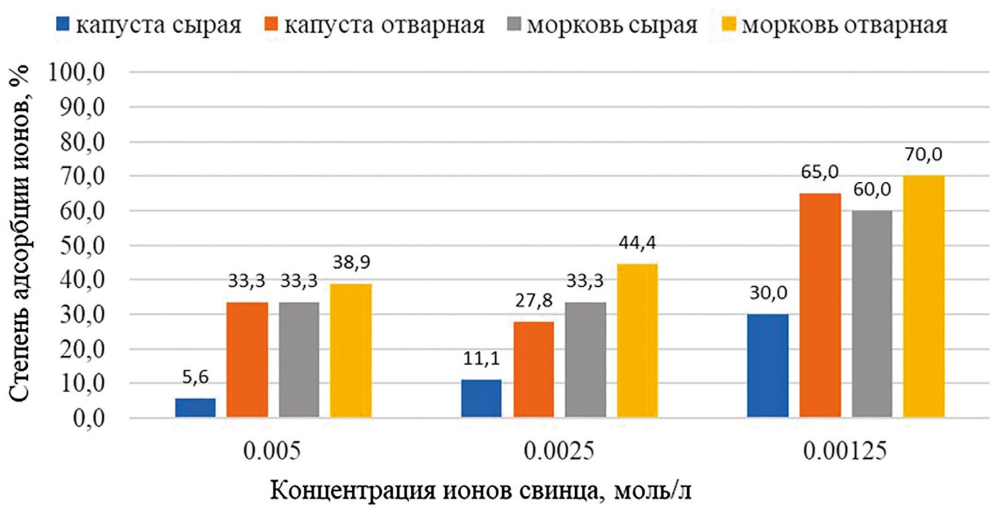


Рис. 3. Степень адсорбции ионов свинца (в %) из растворов, содержащих различные концентрации ионов свинца и фенилаланин, на сырых и термически обработанных овощах через 60 мин

происходит размягчение овощей, высвобождаются растворимые в воде пектиновые вещества и другие полисахариды, способные больше адсорбировать, чем связанные.

Следует отметить, что с уменьшением концентрации ионов свинца увеличивалась степень извлечения ионов из растворов, содержащих фенилаланин. Аналогичные тенденции наблюдаются и в растворах других АК.

Адсорбционная способность овощей по отношению к ионам свинца зависит от строения АК и значения pH ее водного раствора (рис. 4). Минимальная степень адсорбции свинца наблюдается при содержании в растворе глутаминовой аминокислоты (кислая АК).

Полученные данные согласуются с данными авторов [22]: сорбционная активность исследованных пектиновых веществ при понижении pH среды уменьшалась. Для раство-

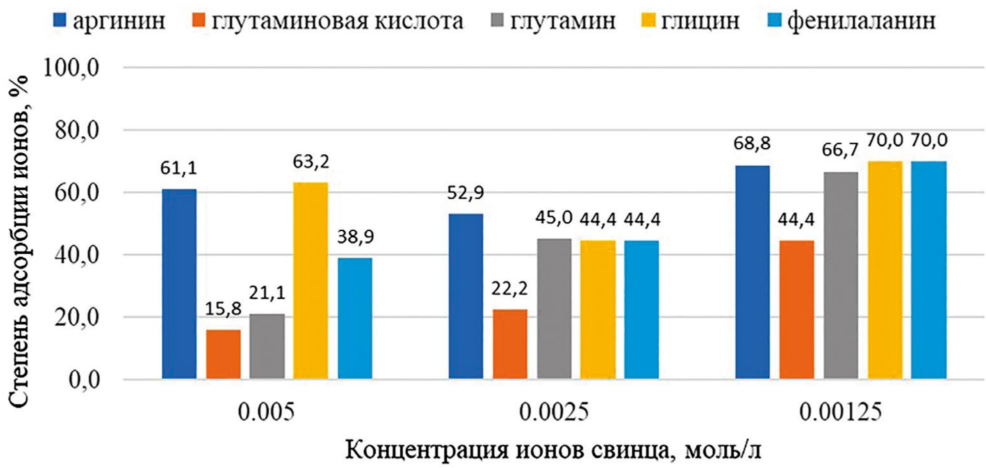


Рис. 4. Степень адсорбции ионов свинца (в %) через 60 мин на вареной моркови в зависимости от содержания различных АК в растворе

ра, содержащего ионы свинца и глутаминовую кислоту (С = 0,005 моль/л), при значении pH = 4,21 степень адсорбции составила 15,8%, для растворов аналогичной концентрации в присутствии фенилаланина (pH = 5,47) – 38,9% и аргинина (pH = 8,22) – 61,1% (по экспериментальным данным, представленным в работе [32]). Экспериментальные результаты можно объяснить следующим образом. В кислой среде, с очень низкой концентрацией OH^--групп, формируются растворимые комплексные соединения АК с ионами свинца, которые характеризуются лиофильным взаимодействием с растворителем (водой). Поэтому закономерно, что при снижении pH адсорбционная способность пектиновых веществ снижается. При увеличении pH (pH = 3 и выше) концентрация OH^--групп увеличивается и возникает возможность образования полилигандных соединений, включающих в себя OH^--группы. При этом лиофильные свойства снижаются, а адсорбционная способность увеличивается, что подтверждается нашими данными: в присутствии аргинина при pH = 8,22 адсорбционная способность максимальна. Более того, именно присутствие в структуре аргинина дополнительных атомов азота – сильных электрондонорных атомов – увеличивает вероятность образования более устойчивых комплексных соединений его с ионами свинца.

Ниже приведены значения адсорбции ионов свинца из растворов, содержащих малую концентрацию металла и аминокислот, пектинсодержащими овощами и яблочным пектином (табл. 1, 2).

В моркови или яблоке содержится около 1% пектина [23, 24], следовательно, при прочих равных условиях адсорбция на яблочном пектине (БАД) составит 0,21–0,62 мг/г, в то время как на моркови и капусте – 1,04–1,81 и 0,84–1,55 мг/г соответственно. Можно предположить, что процесс адсорбции овощами включает адсорбцию и на пектине, и на клетчатке и является более эффективным, чем на яблочном пектине – БАДе.

Если принять среднее содержание свинца в рыбе 0,16 мг/кг, то для приготовления 1 кг целесообразно включить в блюдо 10–100 г моркови или капусты.

Таким образом, проведенное исследование подтвердило известные ранее данные о способности ПВ адсорбировать свинец. При этом показано, что процесс адсорбции происходит более активно на цельном продукте, причем прошедшем термическую обработку, чем на пектине в виде БАД, а также в присутствии аминокислот. Данные результаты свидетельствуют о перспективности разработки корректировок рационов питания населения, проживающего на экологически неблагополучных территориях

Таблица 1

Адсорбция ионов свинца из растворов с АК на вареной капусте, мг/г

Концентрация ионов свинца, моль/л	Аргинин	Глутаминовая кислота	Глутамин	Глицин	Фенилаланин
0,005	2,33	1,81	1,55	2,59	1,55
0,0025	0,91	0,78	1,04	1,04	0,65
0,00125	0,71	0,71	0,71	0,71	0,84

Таблица 2

Адсорбция ионов свинца из растворов, содержащих фенилаланин, мг/г

Концентрация ионов свинца, моль/л	Морковь отварная	Капуста отварная	Яблочный пектин
0,005	1,81	1,55	62,16
0,0025	1,04	0,65	34,19
0,00125	1,04	0,84	21,76

или работающих во вредных условиях труда. Результаты данного исследования свидетельствуют о важности предварительных исследований *in vitro* для подбора наиболее эффективных компонентов рационов до проведения экспериментальных исследований на животных и пациентах.

Выводы

Степень адсорбции ионов свинца в растворах, содержащих овощи (морковь и капусту), увеличивается со временем экспозиции и в присутствии аминокислот, особенно аргинина и глицина. Наиболее эффективно удаляются ионы свинца на термически обработанных овощах.

Адсорбционная способность моркови в отношении ионов свинца выше по сравнению с капустой, что обусловлено повышенным содержанием пектиновых веществ [23, 24]. Адсорбционная способность моркови и капусты значительно выше по сравнению с яблочным пектином, связано это с адсорбционной способностью клетчатки, входящей в состав овощей помимо пектиновых веществ.

Полученные данные могут быть использованы для снижения экологического риска от возможного присутствия соединения свинца в продуктах питания и для организации питания с использованием овощей в качестве гарниров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Корбанова А.И., Сорокина Н.С., Молодкина Н.Н. и др. Свинец и его действие на организм // Медицина труда и промышленная экология. 2001. № 5. С. 29–34.

2. Новикова М.А., Пушкарев Б.Г., Судаков Н.П. и др. Влияние хронической свинцовой интоксикации на организм человека. Сообщ.1 // Сиб. мед. журн. 2013. № 2. С. 13–16.

3. Neil Burford, Melanie D. Ilman, Wesley G. Leblanc, T. Stanley Cameron, Catherine N. Robertson. Definitive identification of lead(ii)-amino acid adducts and the solid state structure of a lead-valine complex // Chem. Commun. (Camb). 2004. Iss. 3. P. 332–333. DOI: 10.1039/b311599b.

4. Новикова Г.В. Синтез и физико-химические характеристики комплексов 6s2- и ndm-ионов металлов с аминокислотами: дис. … канд. хим. наук. 02.00.01 / науч. рук. Н.Н. Головнев; СибГТУ. Красноярск. 2006. 133 с.

5. Шейбак В.М., Лях И.В., Дорошенко Е.М. Нейроактивные аминокислоты в среднем мозге крысят при хронической интоксикации динилом и свинцом // Журн. Гроднен. гос. мед. ун-та. 2012. № 3. С. 40–42.

6. Морозова С.П. Поступление ртути и мышьяка с рационами питания в организм взрослых и детей // Гигиена и санитария. 1991. № 7. С. 38–41.

7. Дударев А.А., Душкина Е.В., Сладкова Ю.Н. и др. Оценка рисков здоровью населения при экспозиции к металлам, содержащимся в местных продуктах питания и питьевой воде в Печенегском районе Мурманской области // Медицина труда и промышленная экология. 2015. № 11. С. 25–33. ISSN1026–9428.
8. Кашуба Н.А. Особенности транскутанного проникновения свинца в организм человека // Гигиена и санитария. 2021. Т. 100, № 1. С. 55–59. https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-1-55-59.
9. Сульдина Т.И. Содержание тяжелых металлов в продуктах питания и их влияние на организм // Рациональное питание, пищевые добавки и биостимуляторы. 2016. № 1. С. 136–140. URL: https://journal-nutrition.ru/ru/article/view?id=35727 (дата обращения: 13.04.2024).
10. Галатова Е.А. Особенности накопления тяжелых металлов в органах и тканях рыб различных семейств // Известия ТСХА. 2009. Вып. 3. С. 157–168.
11. Ершова Т.С., Зайцев В.Ф., Чаплыгин В.А. Особенности миграции свинца в экосистеме Каспийского моря // Уч. зап. Крым. федерал. ун-та им. В.И. Вернадского. Биология. Химия. 2021. Т. 7 (73), № 4. С. 3–22.
12. Попов П.А., Андросова Н.В., Попов В.А. Содержание тяжелых металлов в стерляди Средней Оби // Вестн. СВФУ. 2021. № 3 (83). С. 15–24. https://doi.org/10.25587/SVFU.2021.83.3.011.
13. Лопарёва Т.Я., Шарипова О.А., Петрушенко Л.В. Уровень накопления токсикантов в мышечной ткани рыб в водных бассейнах Республики Казахстан // Вестн. АГТУ. Сер. Рыбное хозяйство. 2016. № 2. С. 115–122. ISSN 2073-5529.
14. Боев В.М., Кряжева Е.А., Бегун Д.Н., Борщук Е.Л., Кряжев Д.А. Гигиеническая оценка риска здоровью населения при комбинированном пероральном поступлении тяжелых металлов // Анализ риска здоровью в гигиене. 2019. № 2. С. 35–43. DOI: 10.21668/health.risk/2019.2.04.
15. Кузьмина Е.А., Малых О.Л., Солобоева Ю.И. и др. Адресные системы медико-профилактической помощи группам риска среди наиболее чувствительных категорий населения, проживающего в зонах влияния промышленных предприятий // Гигиена и санитария. 2017. Т. 96, № 12. С. 1140–1146. http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-12-1140-1146.
16. Михеева Л.А., Февралева М.А., Брынских Г.Т., Тры А.В. Изучение комплексообразующей способности пектина по отношению к меди и свинцу // Ульяновский мед.-биол. журн. 2017. № 2. С. 111–115. DOI: 10.23648/UMBJ.2017.26.6225.
17. Мыкоц Л.П., Туховская Н.А., Бондарь С.Н. Определение кинетики сорбции катиона металла пектином из цитрусовых // Успехи современного естествознания. 2010. № 6. С. 55–57. URL: https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=8255 (дата обращения: 13.04.2024).
18. Мыкоц Л.П., Романцова Н.А., Гущина А.В. Изучение сорбционной способности пектина, выделенного из плодов калины обыкновенной по отношению к ионам свинца // Фундаментальные исследования. 2013. № 3–1. С. 197–200.
19. Бжихатлова М.А., Мыкоц Л.П., Туховская Н.А., Андреева О.А. Исследование сорбционной способности природных сорбентов, выделенных из кампсиса укореняющегося // Химия растительного сырья. 2021. № 1. С. 71–78. DOI: 10.14258/jcprm.2021016618.
20. Борисенков М.Ф., Головченко В.В., Витязев Ф.В. Адсорбция эстрогенов *in vitro* на фракциях пектиновых веществ перца сладкого и капусты белокочанной // Химия растительного сырья. 2011. № 3. С. 53–58.
21. Гуляев Д.К., Белоногова В.Д., Рудакова И.П., Коротков И.В. Исследование полисахаридов побегов малины обыкновенной и их сорбционной активности // Человек и его здоровье. 2022. Т. 25, № 3. С. 72–80. DOI: 10.21626/vestnik/2022–3/08.
22. Макарова К.Е., Хожаенко Е.В., Хотимченко Р.Ю., Ковалев В.В. Сравнительная свинецсвязывающая активность пектинов с различной молекулярной массой *in vitro* // Тихоокеан. мед. журн. 2013. № 2. С. 85–88.
23. Мачнева И.В., Бондаренко А.И. Оценка содержания уровня пектина в некоторых овощах и фруктах // Междунар. студ. науч. вестн. 2016. № 2. С. 212–218. ISSN 2409-529X. URL: https://eduherald.ru/ru/article/view?id=15149 (дата обращения: 13.04.2024).
24. Лимарева Н.С., Донченко Л.В., Оробинская В.Н. Функциональные пектиносодержащие напитки на основе капустного сока // Политематический сетевой электрон. науч. журн. Кубан. гос. аграр. ун-та. 2017. № 134. С. 1018–1030. DOI: 10.21515/1990–4665–134–083.
25. Кузьмин С.В., Гурвич В.Б., Белявский А.Р. Организация, перспективы развития и научно-методические подходы к управлению профессиональными рисками в системе «Медицина труда» в Свердловской области // Урал. мед. журн. 2011. Т. 87, № 9. С. 5–8.
26. Мажаева Т.В., Лаврентьев А.Н., Малых О.Л., Корнилков А.С. Методические подходы к оценке питания различных групп населения в системе социально-гигиенического мониторинга Свердловской области // Урал. мед. журн. 2012. Т. 102, № 10. С. 32–34.
27. Мажаева Т.В. Влияние питания на уровень физического развития дошкольников в условиях неблагоприятного воздействия окружающей среды // Урал. мед. журн. 2011. Т. 80, № 2. С. 53–56.
28. Кацнельсон Б.А., Привалова Л.И., Гурвич В.Б. и др. О роли биопрофилактики в системе мер управления профессиональными и экологически обусловленными химическими рисками для здоровья населения // Токсикол. вестник. 2015. № 1 (130). С. 10–21. ISSN0869–7922.

29. Пешков С.А., Щепин А.С., Хурсан С.Л., Кобзев Г.И. Относительная устойчивость комплексов тяжелых металлов (Zn, Cd, Co, Pb) с аланином // Вестн. Башкир. ун-та. Химия. 2016. Т. 21, № 2. С. 291–297.
30. Дроздова Л.И., Пивненко Т.Н., Караулова Е.П., Ярочкин А.П. Биохимическая характеристика мышечной ткани глубоководных рыб как источника свободных аминокислот и биогенных пептидов // Известия ТИНРО. Технология обработки гидробионтов. 2007. Т. 150. С. 383–390.
31. Костенко Е.Е., Бутенко Е.Н. Изучение комплексообразования Pb (II), Cd (II), Hg (II) с аминокислотами для прогнозирования протекторных свойств пищевых продуктов // Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2012. № 44. С. 85–91.
32. Новосельцева Е.Е., Тихонова И.Л., Белоконова Н.А., Попова О.С. Адсорбционная способность некоторых продуктов питания и сорбентов по отношению к соединениям свинца // Актуальные вопросы современной медицинской науки и здравоохранения: сб. ст. VIII Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов (Екатеринбург, 19–20 апреля 2023 г.). Екатеринбург: УГМУ, 2023. С. 765–771. URL: https://elib.usma.ru/bitstream/usma/13566/1/USMU_Sbornik_statei_2023_149.pdf (дата обращения: 13.04.2024).

REFERENCES

1. Korbanova A.I., Sorokina N.S., Molodkina N.N. et al. Svinets i ego deistvie na organism = [Lead and its effect on the body]. *Meditsina Truda i Promyshlennaya Ekologiya.* 2001;(5):29–34. (In Russ.)
2. Novikova M.A., Pushkarev B.G., Sudakov N.P., Nikiforov S.B., Gol''dberg O.A., Vaverbaum P.M. The effect of persistent lead intoxication on human organism. *Sibirskii Meditsinskii Zhurnal.* 2013;(2):13–16. (In Russ.).
3. Neil Burford, Melanie D. Ilman, Wesley G. Leblanc, T. Stanley Cameron, Catherine N. Robertson. Definitive identification of lead(ii)-amino acid adducts and the solid state structure of a lead–valine complex. *Chem. Commun. (Camb).* 2004;(3):332–333. DOI: 10.1039/b311599b.
4. Novikova G.V. Sintez i fiziko-khimicheskie kharakteristiki kompleksov 6s2- i ndm-ionov metallov s aminokislotami = [Synthesis and physicochemical characteristics of complexes of 6s2- and ndm-metal ions with amino acids]. Dis. for the degree of Cand. Chem. Sci. 02.00.01. Krasnoyarsk; 2006. 133 p. (In Russ.).
5. Sheibak V.M., Lyakh I.V., Doroshenko E.M. Neuroactive aminoacids in the midbrain of infantrats in chronic intoxication with dinil and lead. *Journal of the Grodno State Medical University*. 2012;(3):40–42 (In Russ.).
6. Morozova S.P. Postuplenie rtuti i mysh'yaka s ratsionami pitaniya v organizm vzroslykh i detei. = [Dietary intake of mercury and arsenic into the body of adults and children]. *Gigiena i sanitariya.* 1991;(7):38–41. (In Russ.).
7. Dudarev A.A., Dushkina E.V., Sladkova Yu.N., Chupahin V.S., Lukichova L.A. Evaluating health risk caused by exposure to metals in local foods and drinkable water in Pechenega district of Murmansk region. *Meditsina Truda i Promyshlennaya Ekologiya.* 2015;(11):25–33. (In Russ.).
8. Kashuba N.A. Features of transcutaneous penetration of lead into the human body. *Hygiene and Sanitation.* 2021;100(1):55–59. (In Russ.). https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-1-55-59.
9. Suldina T.I. The content of heavy metals in food and their effects on the body. *Balanced Diet, Nutritional Supplements and Biostimulants.* 2016;(1):136–140. (In Russ.). URL: https://journal-nutrition.ru/ru/article/view?id=35727 (дата обращения: 13.04.2024).
10. Galatova E.A. Osobennosti nakopleniya tyazhelykh metallov v organakh i tkanyakh ryb razlichnykh semeistv = [Features of the accumulation of heavy metals in the organs and tissues of fish of various families]. *Izvestiya TSKhA.* 2009;(3):157–168. (In Russ.).
11. Ershova T.S., Zaitsev V.F., Chaplygin V.A. Features of lead migration in the ecosystem of the Caspian sea. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry.* 2021;7(4):3–22. (In Russ.).
12. Popov P.A., Androsova N.V., Popov V.A. Metals content in the organs of the Starlet of the Acipenser ruthenus of the Middle Ob river. *Vestnik of the North-Esatern Federal University.* 2021;3(83):15–24. (In Russ.). https://doi.org/10.25587/SVFU.2021.83.3.011.
13. Lopareva T. Ya., Sharipova O.A., Petrushenko L.V. Level of accumulation of toxicants in fish muscle tissue in water basins in the Republic of Kazakhstan. *Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Fish Farming.* 2016;(2):115–122. (In Russ.).
14. Boev V.M., Kryazheva E.A., Begun D.N., Borshchuk E.L., Kryazhev D.A. Hygienic assessment of population health risks caused by combined oral introduction of heavy metals. *Health Risk Analysis.* 2019;(2):35–43. (In Russ.). DOI: 10.21668/health.risk/2019.2.04.
15. Kuzmina E.A., Malykh O.L., Soloboyeva Yu.I., Kochergin Yu.V., Plotnikova I.A., Kadnikova E.P. Targeted systems of medicalprevention aid in high-risk groups of most vulnerable categories of the population residing in industry-affected areas. *Hygiene and Sanitation* (Russian journal). 2017;96(12):1140–1146. (In Russ.). http://dx.doi.org/ 10.18821/0016-9900-2017-96-12-1140-1146.
16. Mikheeva L.A., Fevraleva M.A., Brynskikh G.T., Try A.V. Study of complexing ability of pectin with respect to copper and lead. *Ulyanovsk Medical and Biological Journal.* 2017;(2):111–115. (In Russ.). DOI: 10.23648/UMBJ.2017.26.6225.

17. Mykots L.P., Tukhovskaya N.A., Bondar S.N. Determination of kinetics of metal cation sorption with pectin from citrus. *Advances of Modern Natural Science.* 2010;(6):55–57. (In Russ.). URL: https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=8255 (дата обращения: 13.04.2024).

18. Mykots L.P., Romantsova N.A., Gushchina A.V. Research of the pectin isolated from fresh fruits of cranberry high for sorption ability in relation to ion of lead. *Fundamental Research.* 2013;(3–1):197–200. (In Russ.).

19. Bzhikhatlova M.A., Mykots L.P., Tukhovskaya N.A., Andreyeva O.A. Study of the sorption capacity of natural sorbents isolated from Kampsis rooting. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya.* 2021;(1):71–78. (In Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2021016618.

20. Borisenkov M.F., Golovchenko V.V., Vityazev F.V. Adsorbtsiya estrogenov *in vitro* na fraktsiyakh pektinovykh veshchestv pertsa sladkogo i kapusty belokochannoi = [Adsorption of estrogens *in vitro* on fractions of pectin substances of sweet pepper and white cabbage]. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya.* 2011;(3):53–58. (In Russ.).

21. Gulyaev D.K., Belonogova V.D., Rudakova I.P., Korotkov I.V. Study of polysaccharides of common raspberry shoots and their sorption activity. *Humansand Theirhealth.* 2022;25(3):72–80. (In Russ.). DOI: 10.21626/vestnik/2022–3/08.

22. Makarova K.E., Khozhaenko E.V., Khotimchenko R. Yu., Kovalev V.V. Comparative lead-binding activity of pectins with different molecular mass *in vitro. Pacific Medical Journal.* 2013;(2): 85–88. (In Russ.).

23. Machneva I.V., Bondarenko A.I. Evaluation of the content of pectin in some fruits and vegetables. *Modern Problems of Science and Education.* 2016;(2):212–218. (In Russ.). ISSN2686–9101. URL: https://eduherald.ru/ru/article/view?id=15149 (дата обращения: 13.04.2024).

24. Limareva N.S., Donchenko L.V., Orobinskaya V.N. Functional beverages containing pectin on based on cabbage juice. *Scientific Journal of KubSAU.* 2017;(134):1018–1030. (In Russ.). ISSN 1990-4665.

25. Kuzmin S.V., Gurvich V.B., Beliavskii A.P. Organization, perspectives of development, and scientific-methodological approaches to the occupational health risk management within the system "Occupational medicine" in the Sverdlovsk oblast, Russia. *Ural'skij Medicinskij Žurnal.* 2011;87(9):5–8. (In Russ.).

26. Mazhayeva T.V., Lavrentyev A.N., Malykh O.L., Kornilkov A.S. Methodical approaches to assessing nutrition of various population groups in the system of socio-hygienic monitoring of the Sverdlovsk region. *Ural'skij Medicinskij Žurnal.* 2012;102(10):32–34. (In Russ.).

27. Mazhayeva T.V. Effects of nutrition on physical development of preschool children exposed to adverse environmental factors. *Ural'skij Medicinskij Žurnal.* 2011;80(2):53–56. (In Russ.).

28. Katsnelson B.A., Privalova L.I., Gurvich V.B., Kuzmin S.V., Kireyeva E.P., Minigalieva I.A., Sutunkova M.P., Loginova N.V., Malykh O.L., Yarushin S.V., Soloboyeva J.I. The role of bio-prevention in the framework of managing occupational and environmental chemical risks to population health. *Toksikologičeskij vestnik.* 2015;(1):10–21. (In Russ.).

29. Peshkov S.A., Schepin A.S., Khursan S.L., Kobzev G.I. Relative stability of the heavy metal (Zn, Cd, Co, Pb) complexes with alanine. *Vestnik Bashkirskogo Universiteta. Khimiya.* 2016;21(2):291–297. (In Russ.).

30. Drozdova L.I., Pivnenko T.N., Karaulova E.P., Yarochkin A.P. Biochemical description of musclar tissue of deep-water fish as a source of free amino acids and biogenic peptides. *Izvestiya TINRO*. 2007;(150):383–390. (In Russ.).

31. Kostenko E.E., Butenko E.N. Izuchenie kompleksoobrazovaniya Pb (II), Cd (II), Hg (II) s aminokislotami dlya prognozirovaniya protektornyh svojstv pishchevyh produktov = [Study of complex formation of Pb (II), Cd (II), Hg (II) with amino acids to predict the protective properties of food products]. *Naukovi Praci Nacional'nogo Universitetu Harchovih Tekhnologij.* 2012;(44):85–91. (In Russ.).

32. Novosel'tseva E. E., Tikhonova I.L., Belokonova N.A., Popova O.S. Adsorption capacity of some food products and sorbents in relation to lead compounds. *Aktual'nye voprosy sovremennoĭ meditsinskoĭ nauki i zdravookhraneniya*: sbornik statei VIII Mezhdunarodnoĭ nauchno-prakticheskoĭ konferentsii molodykh uchënykh i studentov, Ekaterinburg, 19–20 aprelya 2023 g. Ekaterinburg: UGMU; 2023. P. 765–771. (In Russ.). URL: https://elib.usma.ru/bitstream/usma/13566/1/USMU_Sbornik_statei_2023_149.pdf (дата обращения: 13.04.2024).

Научная статья
УДК 579.8:[615.33+615.322]
DOI: 10.31857/S0869769824020179
EDN: lbzlqk

Проблема антибиотикорезистентности. Вторичные метаболиты растений: антибактериальные свойства и перспективы применения

А.А. Еркин

Аскар Армануды Еркин
магистрант
Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия
askartlegenov12@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-3495-1608

Аннотация. Рассматривается проблема антибиотикорезистентности в мире и причины ее возникновения, а также способы преодоления данной проблемы. Одним из способов является применение вторичных метаболитов растений, обладающих антибактериальными свойствами. Работа включает обзор большого количества исследований, посвященных механизмам действия антибактериальных свойств вторичных метаболитов на бактериальные клетки и возможности их комбинирования с различными антибиотиками для аккумулирования бактерицидного и бактериостатического эффекта и преодоления проблемы резистентности микроорганизмов к антибиотикам.

Ключевые слова: антибиотикорезистентность, вторичные метаболиты растений, комбинированное действие, механизмы действия, обзоры

Для цитирования: Еркин А.А. Проблема антибиотикорезистентности. Вторичные метаболиты растений: антибактериальные свойства и перспективы применения // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 2. С. 199–212. http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020179, EDN: lbzlqk

Original article

The problem of antibioticresistance. Secondary plant metabolites: antibacterial properties and application prospects

A.A. Yerkin

Askar Armanuly Yerkin
Master's Student
Orenburg State University, Orenburg, Russia
askartlegenov12@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-3495-1608

Abstract. The review examines the problem of antibiotic resistance in the world and the causes of resistance, as well as a way to overcome this problem. One of the ways to overcome it is the use of secondary metabolites of plants with antibacterial properties. The review includes a large number of studies on the mechanisms of action of the antibacterial properties of secondary metabolites on bacterial cells and the possibility of combining them with various antibiotics to accumulate bactericidal and bacteriostatic effects and overcome the problem of resistance of microorganisms to antibiotics.

Keywords: antibiotic resistance, secondary metabolites of plants, combined action, mechanisms of action, reviews

For citation: Yerkin A. A. The problem of antibioticresistance. Secondary plant metabolites: antibacterial properties and application prospects. *Vestnik of the FEB RAS.* 2024;(2):199–212. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020179, EDN: lbzlqk

Введение

Еще в 40–50-х годах XX в. возникла такая проблема, как устойчивость к антибиотикам, дошедшая и до нашего времени. Устойчивость к широкому спектру антибактериальных препаратов многих патогенов является серьезной угрозой для здравоохранения XXI в. [1]. В обзорах О'Нила об антибиотикорезистентности в Великобритании говорилось о том, что из-за данных патогенов к 2050 г. в среднем будет погибать 10 млн чел. в год [2, 3].

Так, к 2010 г. уже более 90% стафилококков и энтерококков, выделенных от пациентов с тяжелыми инфекциями, были устойчивы к большинству антибиотиков [4]. Если не остановить их развитие, то в будущем оно может привести к более смертоносным патогенам, чем сегодня. И помимо проблем, связанных с разработкой новых антибиотиков и в целом с использованием антибиотиков в неоправданно больших количествах, остро стоит проблема понимания истинного бремени устойчивости, особенно в местах с минимальной активностью санэпиднадзора.

На данный момент существует обширный список исследований, оценивающих влияние устойчивых к антибиотикам патогенов на количество случаев заболеваемости, смертности, затраты на общественное здравоохранение, но данные исследования затрагивают, как правило, определенный континент, страну, регион, участок, и нет оценок, охватывающих весь мир и весь спектр патогенных микроорганизмов и взаимодействий между патогеном и антибактериальным препаратом [5–11].

Проблема, связанная с устойчивостью патогенных микроорганизмов к антибиотикам, привела к потребности в новых антибактериальных препаратах. Многие исследованные соединения с высокой антибактериальной активностью проявляли цитотоксические свойства, что приводило к ярко выраженным побочным эффектам [12]. Одной из важнейших задач биомедицины является поиск или создание молекул, проявляющих свойство неселективного антибиотика. Данную задачу можно решить с помощью биологически активных веществ растений, обладающих антибактериальными свойствами.

Механизмы возникновения антибиотикорезистентности

Со времен открытия пенициллина в поле зрения людей все больше стали попадать микроорганизмы, устойчивые к антимикробным препаратам [13, 14].

Рисунок 1 иллюстрирует основные механизмы резистентности к антимикробным препаратам у микроорганизмов.

Модификация или мутация мишени

Бактерицидное или бактериостатическое действие антибиотиков объясняется взаимодействием между молекулой антибиотика и мишенью в бактериальной клетке. Соответственно, если происходит мутация или модификация мишени, то данное изменение будет влиять на действие антибиотика (рис. 1, *а*). Спонтанные мутации у бактерий возникают с частотой $10^{-8}/10^{-9}$. Это означает, что из 108–109 бактерий одна выработает устойчивость к антибиотику [15]. Основным механизмом быстрого распространения резистентности является горизонтальный перенос генов.

Примером модификации мишени служат пенициллинсвязывающие белки. Данные белки участвуют в синтезе пептидогликана клеточной стенки. Одновременно они являются мишенью для β-лактамных антибиотиков [16]. В том случае, если происходит мутация в гене, ответственном за пенициллинсвязывающие белки, или наблюдается модификация данных белков, то сродство между антибиотиками и белками исчезает, делая бактерии устойчивыми к пенициллину.

Другим примером выступает бактерия *Mycobacterium tuberculosis* – ее устойчивость к рифампицину. Устойчивость объясняется мутацией в гене rpoB [17]. Данный ген включает в себя 3534 пары оснований, по результатам многих исследований выяснилось, что мутация в гене происходит в положении 507–533 пары оснований, и именно эта область является ключевой в формировании устойчивости к рифампицину [18, 19].

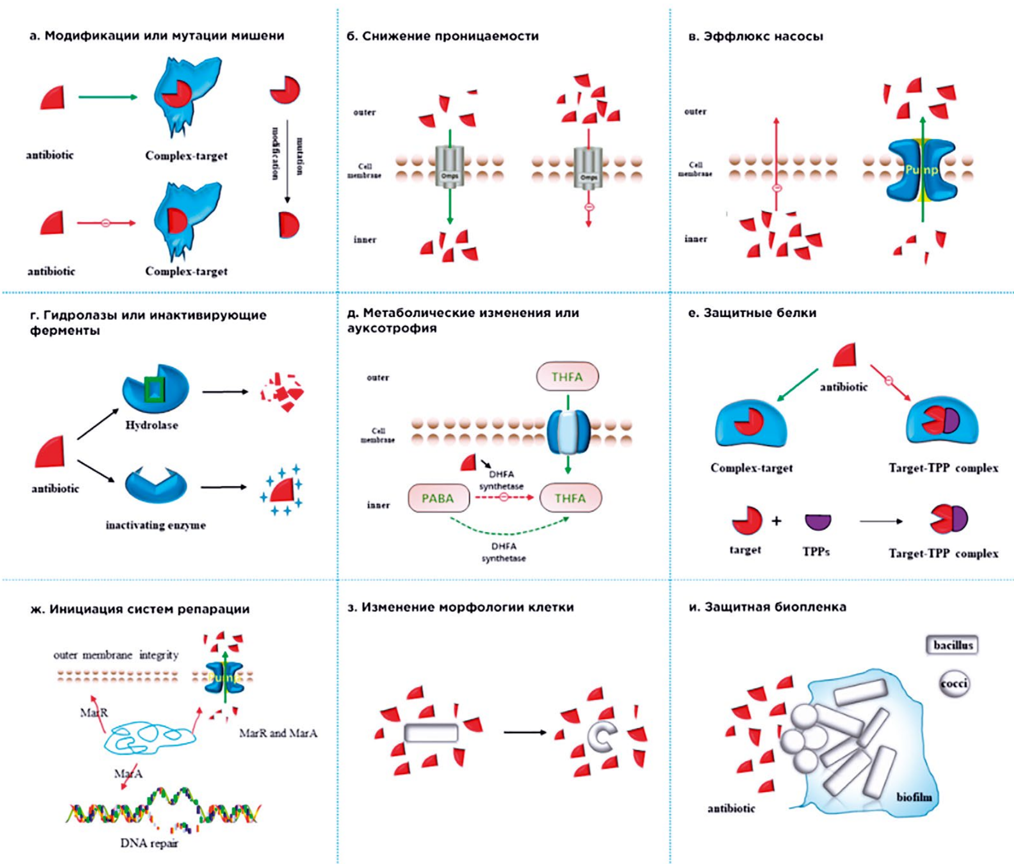


Рис. 1. Основные механизмы устойчивости бактерий к антибиотикам [24]

Снижение проницаемости

В связи с особенностями строения клеточной стенки у грамположительных и грамотрицательных бактерий некоторые вещества имеют более низкую или высокую проходимость. Так, у грамотрицательных бактерий клеточная стенка представлена в основном липополисахаридом, через данный слой гидрофильные соединения транспортируются посредством специальных белков – поринов [20, 21]. Разный тип поринов синтезируется у разных видов бактерий, при нарушении функционирования порина или при его удалении у бактерий повышается вероятность возникновения резистентности к антибиотику [22]. К примеру, *Pseudomonas aeruginosa* стала более устойчивой ко многим антибиотикам благодаря потере на внешней мембране порина OprD (рис. 1, *б*) [23].

Эффлюкс-насосы

Эффлюкс-насосы (рис. 1, в) располагаются в плазмолемме и участвуют в транспорте различных веществ. Это мощный и быстродействующий механизм устойчивости [25]. Выделяют пять семейств эффлюкс-насосов:

- MFS (Major Facilitator Superfamily)
- MATE (Multidrug and Toxic compound Extrusion)
- SMR (Small Multidrug Resistance)
- RND (Resistances Nodulations Division)
- ABC (ATP-binding Cassette superfamily)

Наиболее значимы в клинической практике эффлюкс-насосы семейства RND. Примерами насосов семейства RND являются Tet-помпы (тетрациклин) или Mef-помпы (макролиды). MexAB-OprM эффлюкс-насос семейства RND откачивает широкий спектр токсических веществ, что придает синегнойной палочке высокую устойчивость к β-лактамам, хлорамфениколу, тетрациклину, триметоприму, сульфаметоксазолу и некоторым фторхинолонам [25].

Гидролазы или инактивирующие ферменты

В развитии механизмов устойчивости бактерий к антибиотикам одну из важнейших ролей играют инактивирующие антибиотики ферменты (рис. 1, *г*). Наиболее широко известными ферментами, нарушающими работу антибиотиков, являются β-лактамазы. Данные ферменты ковалентно связываются с карбонильной частью молекулы антибиотика, приводя его к деградации.

Для лечения туберкулеза и проказы в первую очередь применяют рифампицин. Механизм действия рифампицина заключается в ингибировании РНК-полимеразы, т. е. в нарушении процессов транскрипции. Команда исследователей из института Фридриха Леффлера обнаружила NAD-зависимые ферменты, инактивирующие действие рифампицина [31].

Метаболические изменения или ауксотрофия

Результаты исследования, проведенные Зампьери [26], показывают, что мутации в генах, участвующих в метаболических процессах, могут приводить к возникновению устойчивости к антибиотикам у патогенного штамма кишечной палочки (рис. 1, *д*). Так, мутация в гене, кодирующем фермент 2-оксоглутаратдегидрогеназы, подавляет активность цикла трикарбоновых кислот, и метаболическая токсичность, вызываемая антибиотиком, не возникает [27].

Некоторые антибиотики являются аналогами нормальных метаболитов, которые конкурируют с ними за каталитический центр фермента. Так, сульфаниламид выступает структурным аналогом ПАБК (парааминобензойной кислоты), ПАБК – предшественник тетрагидрофолата, необходимого для жизнедеятельности бактерий метаболита. Встраивание молекулы сульфаниламида в активный центр фермента дигидроптероатсинтетазы приводит к инактивации фермента. Данный фермент ответственен за синтез фолатов, соответственно, синтез фолатов не происходит, рост и развитие бактерий останавливается.

Защитные белки

Синтез белков, защищающих мишени антибиотиков, является одним из механизмов ответа бактерий на воздействие (рис. 1, *е*). Исследователи под руководством Шаркея выделили три типа защитных белков [29].

Первый тип. Защитные белки, связываясь с рибосомами, препятствуют связыванию с ними молекул тетрациклина и тем самым сохраняют биосинтетические процессы в бактериальной клетке. Было обнаружено 13 классов протективных белков первого типа.

Второй тип. Механизм данного типа защитных белков основывается на конформационном изменении мишени антибиотика, так чтобы молекула антибиотика не могла связаться с мишенью. Эта группа защитных белков является основным источником устойчивости бактерий к линкомицинам, макролидам, азадонам, фенолам, плевромутилинам и стропограмминам групп A и B.

Третий тип. Защитные белки рассматриваемого типа работают следующим образом. Инактивированные мишени в комплексе с антибиотиками под действием этих белков изменяют свою конформацию таким образом, что начинают функционирование даже будучи связанными с антибиотиками. Так, один из механизмов резистентности *Staphylococcus aureus* к фузидиевой кислоте объясняется приобретением гена, кодирующего защитный белок третьего типа – FusB (FusB – protein). Фузидиевая кислота, взаимодействуя с фактором элонгации EF-G (elongation factor G), ингибирует синтез белка. Однако белок FusB, связываясь с EF-G, даже в присутствии фузидиевой кислоты приводит к диссоциации EF-G от рибосом, и как только комплекс FusB + EF-G + фузидиевая кислота покидает рибосому, фузидиевая кислота отделяется от EF-G, поскольку имеет низкое сродство к свободному EF-G, и затем фузидиевая кислота может быть удалена благодаря активному транспорту, а синтез белка продолжится [30].

Инициация систем репарации

Оперон множественной антибиотикорезистентности у кишечных бактерий управляет репарацией ДНК и целостностью внешней мембраны (рис. 1, *ж*). Локус множественной антибиотикорезистентности MAR (multiple antibiotic resistance) у *E. coli* является определяющим фактором перекрестной резистентности к тетрациклинам, хинолам и β-лактамам. Белок, кодируемый генами локуса MAR, MarA усиливает регуляцию генов, необходимых для репарации ДНК, тем самым уменьшая повреждение ДНК, вызванное антибиотиками [24].

Инициация систем репарации снижает скорость проникновения антибиотиков в клетки и воздействие на клеточные структуры. Системы репарации полностью не устраняют бактериостатический эффект антибиотиков, но повышают толерантность бактерий к ним.

Изменение морфологии клеток

Эффективность действия антибиотиков зависит также от морфологии клеток. Из рис. 1, *з* следует, что увеличение объема клетки приводит к разбавлению антибиотиков.

Исследования, проведенные в университете Ньюкасла (Великобритания), показали, что клетки *Caulobacter crescentus*, изменяя свою морфологию (рис. 2), смогли восстановить темп деления и роста, какими они были до воздействия на них антибиотиками [28]. После того как антибиотик был удален, морфология клеток вернулась к первоначальной форме через несколько поколений. Можно сделать

Рис. 2. Модель, показывающая переключение бактерии с клеточной стенки на L-форму [28]

вывод о том, что некоторые бактерии приспособились менять свою морфологию и нивелировать действие антибактериальных препаратов.

Бактериальная биопленка

Биопленка – сообщество микроорганизмов, располагающихся на инертных объектах, например на слизистых оболочках организма. Такие сообщества чаще всего представлены разными видами бактерий. Разнообразие бактерий в сообществе способствует изменению структуры биопленки, чем больше разных видов бактерий в сообществе, тем выше защитная способность биопленки и больше шансов развития резистентности микроорганизмов к антибиотикам (рис. 1, *и*).

Вторичные метаболиты растительного происхождения

Растения являются автотрофными организмами, следовательно, наряду с основным, первичным метаболизмом у них присутствует вторичный метаболизм. Он позволяет накапливать разные химические соединения, играющие немалую роль в жизнедеятельности растений. Химические соединения, образуемые во вторичном метаболизме, соответственно, называются вторичными метаболитами (ВМ).

Функции вторичных метаболитов связывают с иммунной системой растений. Также вторичные метаболиты действуют как аллелопатические вещества, влияющие на рост и развитие других растений, участвуют в привлечении опылителей и в адаптации растительного организма.

Поиск и изучение соединений вторичного метаболизма растений является важной задачей, поскольку благодаря полученным знаниям имеется возможность применять данные соединения в различных сферах и отраслях промышленности [32].

Классификация ВМ растений

Классификацию вторичных метаболитов можно основывать на различных критериях, но главным является путь биосинтеза.

На базе данного критерия выделяют три большие группы вторичных метаболитов: алкалоиды, терпены и фенольные соединения.

Алкалоиды – широко распространенная группа химических соединений, содержащих по меньшей мере один атом азота и образующих кольцо. Алкалоиды присутствуют в виде солей органических кислот в разных частях растений. Так, в листьях содержится никотин, в коре – хинин и цинхонин, в семенах – стрихнин, в корнях – равельфинин, пунарнавин.

В классификации алкалоидов также присутствуют несколько критериев, основным из которых является биосинтетическое происхождение. Выделяют истинные алкалоиды (кокаин), проалкалоиды (эфедрин), псевдоалкалоиды (соланидин).

На данный момент было выявлено около 15 000 алкалоидов, но так как большинство представителей растительного мира остаются неоткрытыми, то ясно, что имеется широкое поле для исследований и исследователей.

Терпеноиды составляют самую большую группу вторичных метаболитов и состоят из изопреновых звеньев. Эти ВМ представляют собой непредельные соединения с открытой цепью или циклические ненасыщенные соединения, имеющие одну либо несколько двойных связей. Следовательно, они легко вступают в реакцию с водородом, галогеном, кислотами и др. Некоторые терпеноиды имеют в составе g-лактоновое кольцо, которое определяет их биологическую активность, в том числе токсичность.

Классификация терпеноидов основывается на количестве изопреновых звеньев, соответственно выделяют: монотерпены (лимонен), сесквитерпены (артемизин), дитерпены (форсколин), тритерпены (α-амирин), тетратерпены (β-каротин) и политерпены (каучук).

Помимо терпеноидов растения также производят большое количество вторичных метаболитов ароматической группы – *фенольных соединений*, содержащих одну или несколько гидроксильных групп. То есть характерной чертой для данной группы вторичных метаболитов является наличие ароматического кольца и гидроксильной группы.

Классификация фенольных соединений осуществляется на основе количества ароматических веществ и присоединенных к ним атома углерода. Исходя из этого можно выделить группы с одним, двумя ароматическими кольцами и полимерные фенольные соединения.

Фенольные соединения выполняют различные функции в растительном организме, основной из них является защита от фитопатогенных микроорганизмов. Для этого растения синтезируют фитоалексины, которые, в свою очередь, являются фенольными соединениями.

Антибактериальное действие ВМ растений

Алкалоиды

Пиперин – алкалоид пиперидинового типа, выделенный из *Pipernigrum* и *Piperlongum*. При одновременном применении с ципрофлоксацином ингибировали рост мутантного *S. aureus*, а также заметно снижали значения МИК (минимальной ингибирующей концентрации) для *S. aureus* [33]. Совместное применение пиперина и гентамицина было эффективным при комбинированной инфекции MRSA (метициллинрезистентный золотистый стафилококк) [34]. Было изучено применение пиперина в качестве ингибитора эффлюкс-насоса, результаты показали, что это соединение влияет на активность эффлюкс-насоса NorA у *S. aureus* MRSA. Антибактериальные свойства были показаны против *S. aureus, Bacillus subtilis, Salmonella sp.* и *E. coli* (рис. 3).

При одновременном применении рифампицина и пиперина в соотношении 3:7 было выявлено их синергидное взаимодействие в отношении *S. aureus* с множественной лекарственной устойчивостью (МЛУ) [35]. Комбинированный препарат (рифампицин 200 мг + пиперин 10 мг) оказывает меньшее токсическое действие на человека в сравнении с обычным рифампицином. Соединение пиперина было использовано в качестве ингибитора эффлюкс-насоса, результаты показали, что пиперин влияет на активность эффлюкс-насоса NorA у МЛУ *S. aureus* [36]. Пиперин в концентрации 12,5 и 25 мкг/мл заметно снижал МИК для *S. aureus* (ATCC29213) [37].

Берберин – изохинолиновый алкалоид, выделен из растений семейства барбарисовых (Berberidaceae). Издревле применяется в китайской народной медицине.

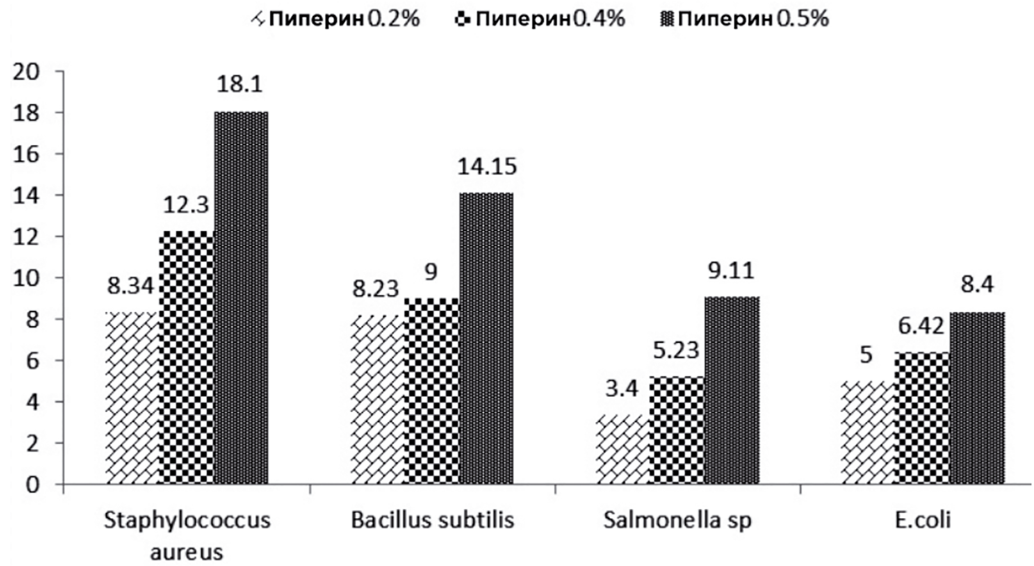


Рис. 3. Зоны ингибирования под действием экстракта пиперина (в мм) [33]

Проявляет противомикробную активность. Так, берберин является ДНК-лигандом, и некоторые оказываемые им эффекты, в частности удлинение бактериальных клеток, могут быть объяснены связыванием или повреждением ДНК и последующей индукцией бактериального SOS-ответа [38]. В результате исследований было выявлено ингибирующее действие берберина на деление бактериальной клетки. На рис. 4 видим, что флуоресцентные красители распределились равномерно по клетке, это говорит о том, что у обработанных берберином клеток была нарушена полимеризация белка FtsZ (бактериальный гомолог тубулина). Белок FtsZ участвует в формировании перегородки между делящимися клетками.

Томатидин – анаболический алкалоид, выделен из семейства пасленовых (помидоры, баклажан и т.д.). Исследователи из университета Шербрука выявили синер-

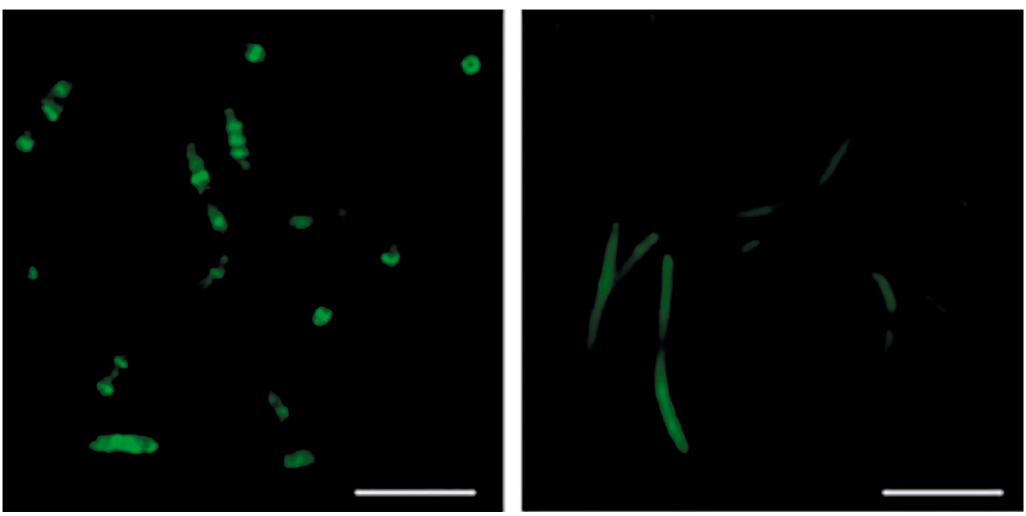


Рис. 4. Эффект воздействия берберина на морфологию клеток *E. coli*: слева – клетки, не обработанные, справа – обработанные берберином [38]

гидный эффект взаимодействия томатидина с гентамицином и ципрофлоксацином против как грамположительных (*S. aureus*), так и грамотрицательных (*P. aeruginosa* и *Enterococcus faecalis*) бактерий [39].

Конесин – алкалоид, полученный из растений семейства кутровых (Apocynaceae). Обладает антибактериальным действием в отношении грамположительных и грамотрицательных бактерий. Также использовался в качестве соединения, модифицирующего устойчивость *Acinetobacter baumannii* к антибиотикам. Благодаря исследованиям сотрудников университета имени принца Сонгла (Тайланд) была выяснена способность конесина ингибировать эффлюкс-насос *A. baumannii*, тем самым делая данный патоген более чувствительным к антибиотикам [40].

Терпены

Терпены широко распространены в природе, присутствуют почти во всех организмах разной сложности строения и выполняют разнообразные функции. В растениях терпены находятся главным образом в генеративных органах (цветки, плоды). Обладая антибактериальной активностью, они участвуют в противомикробной защите растений.

Карвон – один из терпенов, который может быть потенциально использован как антибактериальный препарат. Были получены данные об активности карвона по отношению к *S. aureus*, *P. aeruginosa, Enterobacter aerogenes* и *E. coli* (см. таблицу). Так, одной из мишеней действия карвона является ДНК. Результаты многих исследований демонстрировали, что поврежденная карвоном ДНК преобразует сверхспиральную ДНК в открытую кольцевую ДНК, линейную ДНК и далее фрагментированную ДНК. Это индуцирует гибель клеток из-за потери метаболического контроля [41]. Карвон также обладает антифунгицидным свойством против *Candida albicans*, ингибируя переход дрожжевой формы кандиды в нитчатую (нитчатая форма кандиды ответственна за патогенность гриба).

Тимол – монотерпен, полученный из растений семейства яснотковых (Lamiaceae). Как и карвон, обладает и антибактериальным, и антифунгицидным свойством. Антибактериальные свойства тимола и карвона были проверены по отношению к *E. coli, E. aerogenes, S. aureus* и *P. aeruginosa* (см. таблицу).

В результате исследования минимальная ингибирующая концентрация для тимола составила 0,005–0,008 мг/мл и для карвона – 0,007–0,008 мг/мл [42].

Механизм антибактериального действия терпенов состоит в их липофильных свойствах. Таким образом, терпены, влияя на структуру мембраны, изменяют ее текучесть и проницаемость.

Зоны ингибирования под действием тимола и карвона [41]

Бактерия	Зона ингибирования, мм		
	Тимол	Карвон	Ципрофлоксацин
E. coli	19	18	25
E. aerogenes	23	20	25
P. aeruginosa	28	19	26
S. aureus	26	25	25

Фенольные соединения

Фенольные соединения (флавоноиды) широко распространены в природе и издревле применяются в медицине. Фенолы проявляют высокую антибактериальную активность, а также способны усиливать действие некоторых антибиотиков.

Основным противомикробным действием фенолов является способность подавлять эффлюкс-насосы устойчивых к антибиотикам штаммов бактерий.

Одним из перспективных соединений является ресвератрол. Ресвератрол синтезируется некоторыми растениями в ответ на воздействие паразитов, грибов и бактерий. Данный фенол, согласно исследованиям, способен подавлять эффлюкс-насос *Campylobacter jejuni* [43].

По результатам исследованиям М. Вестергаарда мишенью ресвератрола является связывание АТФ-синтазы у *E. coli* [44]. А. Хотра выявил подобную мишень действия ресвератрола у *Mycobacterium smegmatis* [45]. Данное соединение также способно воздействовать на белок FtsZ, который, как уже говорилось выше, ответственен за деление бактериальной клетки.

Ингибитором эффлюкс-насосов может быть еще одно фенольное соединение – биоханин А. Исследования, проведенные в Гонконгском университете, выявили антибактериальную активность против МЛУ *S. aureus* путем подавления экспрессии эффлюкс-насоса [46]. Сообщалось также о высокой антибактериальной активности биоханина А по отношению к *Xanthomonas axonopodis* [47]. Механизмом действия является ингибирование репликации ДНК и образования жгутиков. Биоханин А проявлял активность и против внутриклеточной бактерии рода *Chlamydia* [48].

Кемпферол – еще один флавоноид, выделенный из растений семейств живокость (Delphinium), камелия (Camellia).

Доказано, что кемпферол обладает антибактериальным эффектом против флуконазолустойчивых патогенов. Дж. Холлер с соавт. получили данные о том, что рамнозид кемпферола, выделенный из растения пиррозия язычная *Pyrrosia lingua*, в комбинации с ципрофлоксацином усиливает свойство последнего по отношению к мутантному штамму *S. aureus*, сверхэкспрессирующее эффлюкс-насос [49].

Гибридизация антибиотиков со вторичными метаболитами растений привлекает все больший интерес исследователей, поскольку многочисленные результаты свидетельствуют о среднем и сильном антибактериальном эффекте вторичных метаболитов. Имеются также работы, указывающие на повышение антибактериальных свойств антибиотиков в комбинации с вторичными метаболитами, что подтверждает желаемый двойной способ действия.

Заключение

Из вышеизложенного следует, что вторичные метаболиты, продуцируемые растительными организмами и предназначенные для защиты растений от фитопатогенов, характеризуются выраженной антибактериальной активностью.

Различные семейства растений, которые были протестированы, продемонстрировали, что их представители обладают уникальной комбинацией вторичных метаболитов с различными механизмами подавления бактерий.

Несколько вторичных метаболитов проявили высокоэффективную антимикробную активность. В некоторых случаях растительные экстракты, содержащие эти фитохимические вещества, имели более высокую зону ингибирования, чем антибиотики. В настоящее время проводятся новые исследования по выявлению, очистке и тестированию антимикробной активности различных вторичных метаболитов.

Вторичные метаболиты способны помочь в лечении инфекционных заболеваний с повышенной устойчивостью к современным антибиотикам. Они могли бы обеспечить альтернативное медицинское лечение во многих, особенно развивающихся странах, где населению затруднен доступ к услугам здравоохранения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Christopher J.L., Murray K., Shunji I., Fablina Sh., Swetschinski L., Aguilar G.R., Gray A. Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis // Lancet. 2022. Vol. 399. P. 629–655.
2. Review on antimicrobial resistance 2016. URL: https://amr-review.org/sites/default/files/160518_Final%20paper_with%20cover.pdf (дата обращения: 09.10.2023).
3. Review on antimicrobial resistance 2014. URL: https://amr-review.org/sites/default/files/AMR%20Review%20Paper%20-%20Tackling%20a%20crisis%20for%20the%20health%20and%20wealth%20of%20nations_1.pd (дата обращения: 09.10.2023).
4. Zuk M., Dorotkiewicz-Jach A., Drulis-Kawa Z. Bactericidal activities of GM flax seedcake extract on pathogenic bacteria clinical strains. // BMC Biotechnol. 2020. N14. P. 70–75.
5. Antibiotic resistance threats in the United States / US Department of Health and Human Services; US Centers for Disease Control and Prevention. 2019. N12. P. 148–152.
6. Prestinaci F., Pezzotti P., Pantosti A. Antimicrobial resistance: a global multifaceted phenomenon // Pathog. Glob. Health. 2018. Vol. 109 (7). P. 309–318.
7. WHO. Global action plan on antimicrobial resistance 2015. URL: https://www.who.int/ru/publications/i/item/9789241509763 (дата обращения: 10.10.2023).
8. Naylor N.R., Atun R., Zhu N. et al. Estimating the burden of antimicrobial resistance: a systematic literature review // Antimicrob. Resist. Infect. Control. 2018. N25. P. 7–58.
9. CassiniA., Högberg L.D., Plachouras D.et al. Attributable deaths and disability-adjusted life-years caused by infections with antibiotic-resistant bacteria in the EU and the European Economic Area in 2015: a population-level modelling analysis // Lancet Infect. Dis. 2019. Vol. 19 (1). P. 56–66.
10. Lim Ch., Takahashi E., Hongsuwan M. et al. Epidemiology and burden of multidrug-resistant bacterial infection in a developing country // Elife. 2016. Vol. 5. P. 518–582.
11. Temkin E., Fallach N., Almagor J. et al. Estimating the number of infections caused by antibiotic-resistant *Escherichia coli* and *Klebsiella pneumoniae* in 2014: a modelling study // Lancet Glob. Health. 2018. Vol. 6. P. 969–979.
12. Rudd K.E., Johnson S.C., Agesa K.H. et al. Global, regional, and national sepsis incidence and mortality, 1990–2017: analysis for the Global Burden of Disease Study // Lancet. 2020. Vol. 395. P. 200–211.
13. Ge M., Chen Z., Russell H., Onishi H.R., Kohler J., Silver L. Vancomycin derivatives that inhibit peptidoglycan biosynthesis without binding D-Ala-D-Ala // Science. 1999. Vol. 284. P. 507–511.
14. Olaitan A.O. Mechanisms of polymyxin resistance: acquired and intrinsic resistance in bacteria // Front. Microbiol. 2022. N26. P. 605–643.
15. Moffatt J.H., Harper M., Harrison P., Hale J.D., Vinogradov E. Colistin resistance in *A. baumannii* is mediated by complete loss of lipopolysaccharide production // Antimicrob. Agents Chemother. 2018. N54. P. 4971–4977.
16. Eliopoulos G.M. Quinolone resistance mechanisms in pneumococci // Clin. Infect. Dis. 2020. N15. P. 350–356. DOI: 10.1086/428052.
17. Hooper D.C., Jacoby G.A. Mechanisms of drug resistance: quinolone resistance // Ann. N.Y. Acad. Sci. 2018. Vol. 1354. P. 12–31.
18. Jacoby G.A. Mechanisms of resistance to quinolones // Clin. Infect. Dis. 2005. N15. P. 120–126.
19. Hooper D.C., Jacoby G.A. Topoisomerase inhibitors: Fluoroquinolone mechanisms of action and resistance // Cold Spring Harb. Perspect. Med. 2016. Vol. 6 (9). a025320.
20. Sheed K.A., Phelan J.E. Characterization of rifampicin-resistant *Mycobacterium tuberculosis* in Khyber Pakhtunkhwa // Sci. Rep. 2021. Vol. 11 (1). P. 141–194.
21. Campbell E.A. Structural mechanism for rifampicin inhibition of bacterial RNA polymerase // Cell. 2022. Vol. 104 (6). P. 901–912.
22. Koch A., Mizrahi V., Warner D.F. The impact of drug resistance on *Mycobacterium tuberculosis* physiology: what can we learn from rifampicin? // Emerg. Microbes Infect. 2014. Vol. 3 (3). P. 17–25.
23. Zaw M.T., Emran N.A., Lin Z. Mutations inside rifampicin-resistance determining region of rpoB gene associated with rifampicin-resistance in *Mycobacterium tuberculosis* // J. Infect. Public. Health. 2018. Vol. 11 (5). P. 605–610.
24. Zampieri M. The genetic underground of antibiotic resistance // Science. 2021. N371. P. 783–784.
25. Daoud Z., Kourani M., Saab R. et al. Resistance of *Streptococcus pneumoniae* isolated from Lebanese patients between 2005 and 2009 // Rev. Esp. Quimioter. 2020. Vol. 24 (2). P. 84–90.
26. Chen H., Wang X., Yin Y. et al. Molecular characteristics of oxazolidinone resistance in enterococci from a multicenter study in China // BMC Microbiol. 2019. Vol. 19 (1). P. 162.
27. Konovalova A., Kahne D., Silhavy Th. Outer membrane biogenesis // Annu. Rev. Microbiol. 2017. N71. P. 539–556.
28. Mickiewicz K.M., Yoshikazu K., Drage L. et al. Possible role of L-form switching in recurrent urinary tract infection // Nat. Com. 2019. Vol. 10 (1). 4379.

29. Greene N.P., Kaplan E., Crow A., Koronakis V. Antibiotic resistance mediated by the MacB ABC transporter family: A structural and functional perspective // Front. Microbiol. 2018. N9. P. 950.

30. Studemeister A.E., Quinn J.P. Selective imipenem resistance in *Pseudomonas aeruginosa* associated with diminished outer membrane permeability // Antimicrob. Agents Chemother. 2018. Vol. 32 (8). P. 1267–1268.

31. Kornelsen V., Kumar A. Update on multidrug resistance efflux pumps in *Acinetobacter* spp. // Antimicrob. Agents Chemother. 2021. Vol. 65 (7). P. 514–521.

32. Raskin I., Ribnicky D., Komarnytsky S. et al. Plants and human health in the twenty-first century // Trends Biotechnol. 2002. Vol. 20 (12). P. 522–531.

33. Hikal D. Antibacterial activity of piperine and black pepper oil // Biosci. Biotechn. Res. Asia. 2018. Vol. 15 (4). P. 877–880.

34. Khameneh B., Iranshahy M., Ghandadi M. et al. Investigation of the antibacterial activity and efflux pump inhibitory effect of co-loaded piperine and gentamicin nanoliposomes in methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* // Drug Dev. Ind. Pharm. 2015. Vol. 41 (6). P. 989–994.

35. Mgbeahuruike E.E. et al. Antimicrobial and synergistic effects of commercial piperine and piperlongumine in combination with conventional antimicrobials // Antibiotics (Basel). 2019. Vol. 8 (2). P. 55.

36. Nagendran Tharmalingam, Sa-Hyun Kim, Min Parket al. Inhibitory effect of piperine on *Helicobacter pylori* growth and adhesion to gastric adenocarcinoma cells // Infect. Agent. Cancer. 2014. Vol. 9 (1). P. 43–45.

37. Amit Kumar Tripathi, Anup Kumar Ray, Sunil Kumar Mishra. Molecular and pharmacological aspects of piperine as a potential molecule for disease prevention and management: evidence from clinical trials // Beni-Suef Univ. J. Basic. Appl. Sci. 2022. Vol. 11 (1). P. 16.

38. Somma A., Canè C., Rotondo N. et al. A comparative study of the inhibitory action of berberine derivatives on the recombinant protein FtsZ of *E. coli* // Int. J. Mol. Sci. 2023. Vol. 24 (6). P 5674.

39. Soltani R., Fazeli H. et al.Evaluation of the synergistic effect of Tomatidine with several antibiotics against standard and clinical isolates of *Staphylococcus aureus, Enterococcus faecalis, Pseudomonas aeruginosa* and *Escherichia coli.* // Iran J. Pharm. Res. 2017. Vol. 16 (1). P. 290–296.

40. Siriyong T. Conessine, as resistance-modifying agents against extensively drug-resistant *Acinetobacter baumannii //* Microb. Drug Resist. 2022. N22. P. 273–282.

41. Jeong Yoon Kim, Ju Yeon Kim, Jae Yeon Park et al. Synergistic bactericidal effects of carvone and β-lactams against *Xanthomonas campestris pv. vesicatoria* // Appl. Biol. Chem. 2023. N66. P. 45–58.

42. Althunibat O.Y., Qaralleh H., Al-Dalin S.Y.A. et al. Effect of thymol and carvacrol, the major components of *Thymus capitatus* on the growth of *Pseudomonas aeruginosa* // J. Pure Appl. Microbiol. 2016. N10. P. 367–374.

43. Klancnik A., Sikic M., Smole M.S. Jejuni planktonic and biofilm cells, mediated via the CmeABC efflux pump // J. Appl. Microbiol. 2017. N122. P. 65–77.

44. Vestergaard M. Antibacterial and antifungal properties of resveratrol // Int. J. Antimicrob. Agents. 2019. N53. P .716–723.

45. Hotra A., Manuel S., Biucovic G. et al. Deletion of a unique loop in the mycobacterial F-ATP synthase γ subunit sheds light on its inhibitory role in ATP hydrolysis-driven H^+ pumping // FEBS J. 2016. Vol. 283 (10). P. 1947–1961.

46. Zou D., Xie K., Wang H., Chen Y., Xie M. Inhibitory effects of Biochanin A on the efflux pump of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) // Wei Sheng Wu Xue Bao. 2014. Vol. 54 (10). P. 1204–1211.

47. Kai-Xuan Hu, Xin-Chi Shi, Dong Xu et al. Antibacterial mechanism of Biochanin A and its efficacy for the control of *Xanthomonas axonopodis pv. glycines* in soybean // Pest Manag. Sci. 2021. Vol. 77 (4). P. 1668–1673.

48. Hanski L., Genina N., Uvell H. et al. Inhibitory activity of the isoflavone Biochanin A on intracellular bacteria of genus *Chlamydia* and initial development of a buccal formulation // PLoS ONE. 2014. Vol. 9 (12). e115115.

49. Holler J.G., Christensen S.B., Slotved H.C. et al. Novel inhibitory activity of the *Staphylococcus aureus* NorA efflux pump by a kaempferol rhamnoside isolated from *Persea lingue* Nees // J. Antimicrob. Chemother. 2012. Vol. 67 (5). P. 1138–1144.

REFERENCES

1. Christopher J.L., Murray K., Shunji I., Fablina Sh., Swetschinski L., Aguilar G.R., Gray A. Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis. *Lancet*. 2022;399:629–655.

2. Review on antimicrobial resistance 2016. URL: https://amr-review.org/sites/default/files/160518_Final%20paper_with%20cover.pdf (date of application: 09.10.2023).

3. Review on antimicrobial resistance 2014. URL: https://amr-review.org/sites/default/files/AMR%20 Review%20Paper%20-%20Tackling%20a%20crisis%20for%20the%20health%20and%20wealth%20of%20 nations_1.pd (date of application: 09.10.2023).

4. Zuk M., Dorotkiewicz-Jach A., Drulis-Kawa Z. Bactericidal activities of GM flax seedcake extract on pathogenic bacteria clinical strains. *BMC Biotechnology.* 2020;(14):70–75.

5. Antibiotic resistance threats in the United States. US Department of Health and Human Services; US Centers for Disease Control and Prevention. 2019;(12):148–152.

6. Prestinaci F., Pezzotti P., Pantosti A. Antimicrobial resistance: a global multifaceted phenomenon. *Pathogens Global Health.* 2018;(7):309–318.

7. WHO. Global action plan on antimicrobial resistance 2015. URL: https://www.who.int/ru/publications/i/item/9789241509763 (date of application: 10.10.2023).

8. Naylor N.R., Atun R., Zhu N. et al. Estimating the burden of antimicrobial resistance: a systematic literature review. *Antimicrobial Resistance and Infection Control.* 2018;(25):7–58.

9. CassiniA., Högberg L.D., Plachouras D.et al. Attributable deaths and disability-adjusted life-years caused by infections with antibiotic-resistant bacteria in the EU and the European Economic Area in 2015: a population-level modelling analysis. *Lancet Infectious Diseases.* 2019;(1):56–66.

10. Lim Ch., Takahashi E., Hongsuwan M. et al. Epidemiology and burden of multidrug-resistant bacterial infection in a developing country. *Elife.* 2016;(5):518–582.

11. Temkin E., Fallach N., Almagor J. et al. Estimating the number of infections caused by antibiotic-resistant *Escherichia coli* and *Klebsiella pneumoniae* in 2014: a modelling study. *Lancet Global Health*. 2018;6:969–979.

12. Rudd K.E., Johnson S.C., Agesa K.H. et al. Global, regional, and national sepsis incidence and mortality, 1990–2017: analysis for the Global Burden of Disease Study. *Lancet.* 2020;395:200–211.

13. Ge M., Chen Z., Russell H., Onishi H.R., Kohler J., Silver L. Vancomycin derivatives that inhibit peptidoglycan biosynthesis without binding D-Ala-D-Ala. *Science.* 1999;284(5413):507–511.

14. Olaitan A.O. Mechanisms of polymyxin resistance: acquired and intrinsic resistance in bacteria. *Frontiers in Microbiology.* 2022;(26):605–643.

15. Moffatt J.H., Harper M., Harrison P., Hale J.D., Vinogradov E. Colistin resistance in *A. baumannii* is mediated by complete loss of lipopolysaccharide production. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy.* 2018;(54):4971–4977.

16. Eliopoulos G.M. Quinolone resistance mechanisms in pneumococci. *Clinical Infectious Diseases.* 2020;(15):350–356.

17. Hooper D.C., Jacoby G.A. Mechanisms of drug resistance: quinolone resistance. *Annals New York Academy Sciences.* 2018;1354(1):12–31.

18. Jacoby G.A. Mechanisms of resistance to quinolones. *Clinical Infectious Diseases.* 2005;(15):120–126. DOI: 10.1086/428052.

19. Hooper D.C., Jacoby G.A. Topoisomerase inhibitors: Fluoroquinolone mechanisms of action and resistance. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine.* 2016;6(9). a025320.

20. Sheed K.A., Phelan J.E. Characterization of rifampicin-resistant *Mycobacterium tuberculosis* in Khyber Pakhtunkhwa. *Scientific Reports.* 2021;11(1):141–194.

21. Campbell E.A. Structural mechanism for Rifampicin inhibition of bacterial RNA polymerase. *Cell.* 2022;104(6):901–912.

22. Koch A., Mizrahi V., Warner D.F. The impact of drug resistance on Mycobacterium tuberculosis physiology: what can we learn from Rifampicin? *Emerging Microbes and Infections.* 2014;3(3):17–25.

23. Zaw M.T., Emran N.A., Lin Z. Mutations inside Rifampicin-resistance determining region of rpoB gene associated with Rifampicin-resistance in *Mycobacterium tuberculosis*. *Journal of Infection and Public Health.* 2018;11(5):605–610.

24. Zampieri M. The genetic underground of antibiotic resistance. *Science.* 2021;(371):783–784.

25. Daoud Z., Kourani M., Saab R. et al. Resistance of *Streptococcus pneumoniae* isolated from Lebanese patients between 2005 and 2009. *Revista Espanola de Quimioter.* 2020;24(2):84–90.

26. Chen H., Wang X., Yin Y. et al. Molecular characteristics of oxazolidinone resistance in enterococci from a multicenter study in China. *BMC Microbiology.* 2019;19(1):162.

27. Konovalova A., Kahne D., Silhavy Th. Outer Membrane Biogenesis. *Annual Review of Microbiology* 2017;(71):539–556.

28. Mickiewicz K.M., Yoshikazu K., Drage L. Possible role of L-form switching in recurrent urinary tract infection. *Nature Communication*. 2019;10(1).4379.

29. Greene N.P., Kaplan E., Crow A., Koronakis V. Antibiotic resistance mediated by the MacB ABC transporter family: A structural and functional perspective. *Frontiers in Microbiology.* 2018;(9):950.

30. Studemeister A.E., Quinn J.P. Selective imipenem resistance in *Pseudomonas aeruginosa* associated with diminished outer membrane permeability. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*. 2018;32(8):1267–1268.

31. Kornelsen V., Kumar A. Update on multidrug resistance efflux pumps in *Acinetobacter* spp. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*. 2021;65(7):514–521.

32. Raskin I., Ribnicky D., Komarnytsky S. et al. S. Plants and human health in the twenty-first century. *Trends in Biotechnology.* 2002;20(12):522–531.

33. Hikal D. Antibacterial activity of piperine and black pepper oil. *Biosciences. Biotechnology Research Asia.* 2018;15(4):877–880.

34. Khameneh B., Iranshahy M., Ghandadi M. et al. Investigation of the antibacterial activity and efflux pump inhibitory effect of co-loaded piperine and gentamicin nanoliposomes in methicillin-resistant *Staphylococcus aureus. Drug Development and Industrial Pharmacy.* 2015;41(6):989–994.

35. Mgbeahuruike E.E. et al. Antimicrobial and synergistic effects of commercial piperine and piperlongumine in combination with conventional antimicrobials. *Antibiotics* (Basel). 2019;8(2):55.

36. Nagendran Tharmalingam, Sa-Hyun Kim, Min Parket al. Inhibitory effect of piperine on *Helicobacter pylori* growth and adhesion to gastric adenocarcinoma cells. *Infectious Agents and Cancer.* 2014;9(1):43–45.

37. Amit Kumar Tripathi, Anup Kumar Ray, Sunil Kumar Mishra. Molecular and pharmacological aspects of piperine as a potential molecule for disease prevention and management: evidence from clinical trials. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences.* 2022;11(1):16.

38. Somma A., Canè C., Rotondo N. et al. A comparative study of the inhibitory action of berberine derivatives on the recombinant protein FtsZ of *E. coli. International Journal of Molecular Sciences.* 2023;24(6):5674.

39. Soltani R., Fazeli H. et al. Evaluation of the synergistic effect of Tomatidine with several antibiotics against standard and clinical isolates of *Staphylococcus aureus, enterococcus faecalis, Pseudomonas aeruginosa* and *Escherichia coli*. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research.* 2017;16(1):290–296.

40. Siriyong T. Conessine, as resistance-modifying agents against extensively drug-resistant *Acinetobacter baumannii. Microbial Drug Resistance.* 2022;(22):273–282.

41. Jeong Yoon Kim, Ju Yeon Kim, Jae Yeon Park et al. Synergistic bactericidal effects of carvone and β-lactams against *Xanthomonas campestris pv. vesicatoria. Applied Biological Chemistry.* 2023;(66):45–58.

42. Althunibat O.Y., Qaralleh H., Al-Dalin S.Y.A. et al. Effect of thymol and carvacrol, the major components of *Thymus capitatus* on the growth of *Pseudomonas aeruginosa*. *Journal of Pure and Applied Microbiology.* 2016;(10):367–374.

43. Klancnik A., Sikic M., Smole M.S. Jejuni planktonic and biofilm cells, mediated via the CmeABC efflux pump. *Journal of Applied Microbiology.* 2017;(122):65–77.

44. Vestergaard M. Antibacterial and antifungal properties of resveratrol. *International Journal* of *Antimicrobial Agents.* 2019;(53):716–723.

45. Hotra A., Manuel S., Biucovic G. et al. Deletion of a unique loop in the mycobacterial F-ATP synthase γ subunit sheds light on its inhibitory role in ATP hydrolysis-driven H(+) pumping. *FEBS Journal.* 2016;283(10):1947–1961.

46. Zou D., Xie K., Wang H., Chen Y., Xie M. Inhibitory effects of Biochanin A on the efflux pump of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA). *Wei Sheng Wu Xue Bao.* 2014;54(10):1204–1211.

47. Kai-Xuan Hu., Xin-Chi Shi., Dong Xu et al. Antibacterial mechanism of Biochanin A and its efficacy for the control of *Xanthomonas axonopodis pv. glycines* in soybean. *Pest Management Science.* 2021;77(4):1668–1673.

48. Hanski L., Genina N., Uvell H. et al. Inhibitory activity of the isoflavone biochanin A on intracellular bacteria of genus *Chlamydia* and initial development of a buccal formulation. *PLoS ONE.* 2014;9(12). e115115.

49. Holler J.G., Christensen S.B., Slotved H.C. et al. Novel inhibitory activity of the *Staphylococcus aureus* NorA efflux pump by a kaempferol rhamnoside isolated from *Persea lingue* Nees. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy.* 2012;67(5):1138–1144.

Научная статья
УДК 908:58(092)
DOI: 10.31857/S0869769824020182
EDN: lbuvwn

Ботаник и педагог Тарас Петрович Гордеев

А.А. Хисамутдинов

Амир Александрович Хисамутдинов
доктор исторических наук, заведующий отделом научно-исследовательских работ
Центральная научная библиотека ДВО РАН, Владивосток, Россия
khisamut@yahoo.com
http://orcid.org/0000-0002-8228-7513

Аннотация. Публикация посвящена Тарасу Петровичу Гордееву (1875–1967), выпускнику Ново-Александрийского института сельского хозяйства и садоводства (1898 г.). Приехав на Дальний Восток с дипломом ученого агронома и работая преподавателем в Никольск-Уссурийской женской семинарии, Т.П. Гордеев многое сделал для пропаганды естественно-научных исследований в Приморье. Он заложил ботанический сад, ставший впоследствии академической Горнотаежной станцией, устраивал выставки и читал доклады, был среди инициаторов создания Южно-Уссурийского отделения Приамурского отдела Русского географического общества (1916 г.) и проведения Первого съезда по изучению Уссурийского края в естественно-историческом отношении (1922 г.). Его научные интересы были связаны с изучением растительности Южно-Уссурийского края. Уехав в октябре 1922 г. в Китай, Гордеев продолжил научную и педагогическую деятельность в Харбине, где являлся сотрудником ряда русских научно-просветительских организаций, включая Общество изучения Маньчжурского края и Харбинский краеведческий музей, участвовал в экспедиции Н.К. Рериха в район Барги (1934 г.), публиковал научные работы о северо-востоке Китая. Материалами для публикации послужили документы и литература, выявленные в зарубежных библиотеках и архивах, а также частных коллекциях.

***Ключевые слова*:** Т.П. Гордеев, ботанические исследования в Приморье, краеведение, русские исследования на северо-западе Китая, Харбинский краеведческий музей, методы преподавания

Для цитирования: Хисамутдинов А.А. Ботаник и педагог Тарас Петрович Гордеев // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 2. С. 213–221. http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020182, EDN: lbuvwn

Благодарности. Автор благодарен вице-председателю Музея русской культуры в Сан-Франциско (США) Иву Франкьену (Yves Franquen) и русскому библиографу Гавайского университета Патриции Полански (Patricia Polansky) за возможность ознакомиться с русскоязычной зарубежной прессой и использовать эти материалы для подготовки статьи.

Original article

Taras Petrovich Gordeev as a botanist and educator

A. A. Khisamutdinov

Amir A. Khisamutdinov
Doctor of Sciences in History, Head of Research Department
Central Scientific Library, FEB RAS, Vladivostok, Russia
khisamut@yahoo.com
http://orcid.org/0000-0002-8228-7513

Abstract. The article describes the life of Taras Petrovich Gordeev (1875–1967), a graduate of the New Alexandria Institute of Agriculture and Horticulture (1898). Having arrived to the Far East with a diploma as an agronomist and working as a teacher at the Nikolsk-Ussuri Women's Seminary, he did a lot to promote natural science research in Primorye. He founded the botanical garden, which later became the academic Gornotayozhnaya Station, organized exhibitions and delivered reports, he was among those who initiated organizing of the South Ussuri branch of the Amur Department of the Russian Geographical Society (1916) and the First Congress on the researching the Ussuri region in natural history (1922). His own scientific interests were related to the study of vegetation of the South Ussuri region. Having left for China in October 1922, Gordeev continued his scientific and pedagogical activities in Harbin, where he was an employee of a number of Russian scientific and educational organizations, including the Society for the Manchurian Region Study and the Harbin Local Lore Museum, and participated in N. K. Roerich' expedition to the Bargi region (1934), published scientific works on northeast China. The article is based on the documents and literature found in foreign libraries and archives, as well as in private collections.

Keywords: T.P. Gordeev, botanical research in Primorye, local history, Russian research in north-west China, Harbin Local Lore Museum, teaching methods

For citation: Khisamutdinov A. A. Taras Petrovich Gordeev as a botanist and educator. *Vestnik of the FEB RAS.* 2024;(2):213–221. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020182, EDN: lbuvwn

Acknowledgments. The author is grateful to the vice-chairman of the Museum of Russian Culture in San Francisco (USA) Yves Franquen and the Russian bibliographer of the University of Hawaii Patricia Polansky for the opportunity to get acquainted with the Russian-language foreign press and use these materials to prepare the article.

К сожалению, имя Тараса Петровича Гордеева не значится среди основателей российской академической науки на Дальнем Востоке, хотя именно благодаря ему в Уссурийске появился первый ботанический сад, впоследствии преобразованный в Горнотаежную станцию Дальневосточного филиала Академии наук СССР, а Защитный участок южно-уссурийской флоры и фауны стал прообразом будущих заповедников. Об этом ученом больше известно за границей, где жили его ученики, и на страницах эмигрантской печати в Китае, США и Австралии можно найти немало сведений о его деятельности. Ученики исследователя природы Дальнего Востока издали в 1966 г. сборник, вобравший в себя материалы о Т.П. Гордееве, опубликованные в разные годы в русскоязычной прессе [1]. Первым же биографом Т.П. Гордеева считается его ученик Владимир Николаевич Жернаков, опубликовавший об учителе небольшую брошюру [2]. В России имя Гордеева упоминается чаще всего вскользь рядом с именами его коллег и соратников, когда речь идет о научно-просветительских организациях российского

Т.П. Гордеев. Харбин. Около 1935 г. Источник: Государственный архив Хабаровского края

Дальнего Востока или русских исследователях в Китае [3, 4].

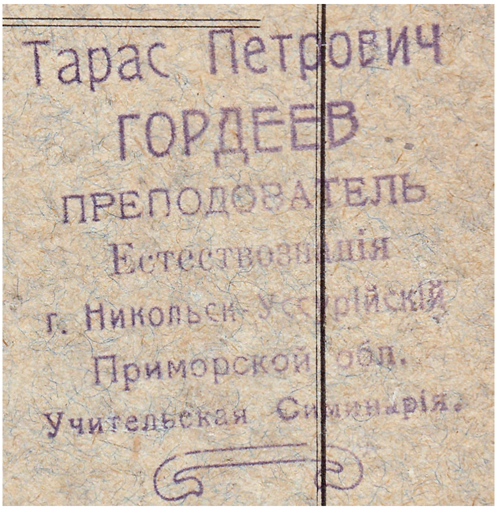
Тарас Гордеев родился 30 октября 1875 г. в семье профессора Харьковского ветеринарного института (Государственный архив Хабаровского края (ГАХК). Ф. 830. Оп. 3. Д. 5829. 49 л.). Еще в Сумском реальном училище он заинтересовался изучением природы и начал составлять коллекции, а в Ново-Александрийском институте сельского хозяйства и садоводства под влиянием профессора Николая Михайловича Сибирцева (1860–1900) окончательно определился как ботаник. Его дипломной работой стало сочинение «Сорная растительность Конско-Вольского имения», написанное по результатам исследований опытного поля института.

Получив диплом ученого агронома первого разряда, Гордеев немного поработал в Харькове, затем в Саратове, а потом отправился с научными целями по другим губерниям. Возможно, эта тяга к перемене мест родилась у него вместе с любовью к произведениям Жюля Верна. В одном из своих стихотворений он высказывался: «Мечтаю я тогда о том, / О чем мечтал еще мальчишкой, / Когда я мир весь забывал / За Жюля Верна чудной книжкой» (ГАХК. Ф. 830. Оп. 3. Д. 5829. Л. 35).

«Будучи земским статистиком и губернским почвоведом, – писал о Гордееве В.Н. Жернаков, – Тарас Петрович много путешествовал, главным образом на лошадях, по различным районам России. Во время своих путешествий ему приходилось останавливаться в деревнях и беседовать с крестьянами. Ботаник всегда с удовольствием вспоминал эти путешествия и считал, что для экскурсий лучшим транспортом является тарантас» [2, с. 8].

Однажды его увлекла идея побывать в Сибири, и Гордеев несколько месяцев работал куратором Минусинского музея, а потом перебрался в Нерчинск. Там он близко познакомился с Петром Николаевичем Рябининым, будущим директором Женской учительской семинарии в г. Никольск-Уссурийском. В 1909 г. Рябинин предложил Гордееву занять должность преподавателя естествознания. В этот период и проявился у Тараса Петровича талант педагога.

Исходя из своего опыта на первое место он поставил практику и организовал в семинарии лабораторные занятия по биологии, физике, химии и почвоведению. Особенно большое значение Гордеев придавал полевым работам в естественной среде, которым еженедельно посвящалось 2–3 часа. В 1910 г. Тарас Петрович разбил на личном участке директора семинарии школьный сад, в котором ученицы занимались посадками, прививками, уходом за растениями, опытами по гибридизации и пчеловодством. Через три года Гордеев заложил Защитный участок южно-уссурийской флоры и фауны, прообраз будущих охраняемых заповедников. Под руководством учителя на участке велся строгий учет растений, производились зарисовки и фотографирование, ежедневные метеорологические и фитофенологические наблюдения. К этой работе помимо учениц



Книжный знак Т.П. Гордеева. Центральная научная библиотека ДВО РАН

семинарии Гордеев привлекал и других молодых людей, интересующихся исследованиями природы.

«В своей педагогической деятельности, – вспоминал Иннокентий Козлов (1898–1984, Сан-Франциско), считавший Гордеева своим учителем, – Тарас Петрович уделял большое внимание экскурсиям. На ближних экскурсиях учащиеся знакомились с природой окрестностей Никольска и собирали коллекции и живой материал для изучения в школе. Помимо ближних за время своей деятельности Тарас Петрович организовал несколько дальних экскурсий: 1) в бухту Славянка для ознакомления с географией побережья Японского моря и морскими флорой и фауной; 2) на Русский остров. У Владивостока к экскурсии присоединился владивостокский педагог-естественник Е.М. Глуздовский, знаток географии Приморья; 3) в корейскую деревню Синеловка, в 30 верстах к юго-западу от Никольска, для ознакомления с шелководством и культурой риса; 4) в г. Хабаровск, для посещения музея и берега р. Амура. В музее объяснения давал его директор В.К. Арсеньев – известный путешественник и знаток Приморской области; 5) во владивостокский музей Общества изучения Амурского края, где находились богатые коллекции по зоологии и этнографии; первые из них были созданы консерватором музея орнитологом А.И. Черским и сотрудником музея энтомологом, доктором медицины А.К. Мольтрехтом, а вторые – В.К. Арсеньевым; 6) на Пьянковский винокуренный завод в окрестностях г. Никольска, на р. Супутинка, среди южно-уссурийской тайги; 7) в ущелье Медвежьи Щёки у Барановского разъезда Уссурийской железной дороги. В экскурсии участвовали педагоги и все классы Женской учительской семинарии. В ущельях среди почти отвесных скал протекает р. Суйфун. В скалах правого берега расположено второе малое ущелье, в тальвеге которого каскадами падает правый приток р. Супруна. Здесь, в малом ущелье, можно было наблюдать замечательную растительность с реликтовыми эндемиками, придающими оригинальный характер южно-уссурийской флоре» [5, с. 23–24].

Школьные гербарии увеличивались после каждой экскурсии, а живые растения, привезенные из этих поездок, находили место в школьном саду и на Защитном участке. В семинарии появились террариумы, пресноводные и морские аквариумы, в которых жили маленькие медузы, раки-отшельники, морские звезды и актинидии нескольких видов. Тарас Петрович устраивал выставки и читал доклады с показом собранных коллекций, таблиц и диапозитивов. Результаты практических занятий демонстрировались на ежегодных школьных выставках. В 1913 г. Никольск-Уссурийская учительская семинария участвовала в масштабной выставке в Хабаровске, посвященной 300-летию дома Романовых. Гордеев и его ученицы рассказывали посетителям выставки об опытах по физиологии растений и влиянию удобрений на их развитие. За организацию Павильона опытной агрономии учитель получил Золотую медаль [6].

В 1918 г. по приглашению учебного отдела Китайско-Восточной железной дороги (КВЖД), организовавшего в Харбине учительские курсы по ознакомлению с местной природой, ботаник прочитал там цикл лекций и провел практические занятия. За время курсов Тарас Петрович заложил школьный сад и совершил с курсантами ознакомитель-

Т.П. Гордеев. Харбинский краеведческий музей. Около 1945 г. Источник: Музей русской культуры в Сан-Франциско

ную поездку в Приморье, побывав в долине р. Кангауз (ныне р. Анисимовка, Шкотовский район) в Сучанской долине (ныне долина р. Партизанской).

Наряду с учебными занятиями Тарас Петрович проводил и собственные исследования, изучая растения Южно-Уссурийского края и обращая особое внимание на лианы [7]. В 1915 г. вместе с И. Козловым и художником Василием Григорьевичем Шешуновым он совершил поездку в бассейны рек Эльдуга и Сандуга и правых притоков р. Суйфун (ныне реки Ананьевка, Нежинка, Раздольная). На галечном берегу р. Сандуга Тарас Петрович собрал новый вид люцерны, который впоследствии описал академик В.Л. Комаров, дав растению имя люцерна Гордеева. Тогда же на р. Малая Эльдуга Гордеев первым из ботаников обнаружил михению крапиволистную, редкое для Приморской области губоцветное растение.

Гражданская война не остановила усилий Гордеева по изучению края и пропаганде исследований по естествознанию. В 1921 г. он совершил экскурсию в Императорскую Гавань (ныне Советская Гавань) вместе с председателем Приморского лесного общества Л.П. Хомяковым, где собрал великолепный гербарий. Вместе с И. Козловым Гордеев съездил в зал. Св. Ольги и староверческое с. Пермское. Поднявшись на вершину высокой горы Зарод, они на гольцах обнаружили новый вид кедра, нечто среднее между корейским кедром и кедровым стлаником. Козлов оставил воспоминания и о посещении Мокрушинской пещеры, где естествоиспытатели «видели сталактиты и оригинальные холмообразные сталагмиты. От подножья и до вершины на сталагмитах были расположены террасовидные водоемчики, а в них шероховатые, ноздреватые шарики, величиной больше горошины. От постоянно капающих со сталактитов капель эти шарики были все время в движении. В то время эта оригинальная находка никем не была описана» [5, с. 24]. Тарас Петрович организовал экскурсию и в верхнюю часть бассейна р. Панихеза (ныне р. Заломная, Пожарский район), где была обследована тисовая роща и описана сосна могильная.

Т.П. Гордеев принимал участие в работе Общества изучения Амурского края и Приморского лесного общества. Он входил в состав комиссии, организованной Управлением земледелия и государственных имуществ и Приморским лесным обществом, которая в 1916 г. обследовала местность по р. Кедровка, где предполагалось устроить Кедровый заповедник (ныне биосферный заповедник «Кедровая падь»). По инициативе Гордеева и другого преподавателя Никольск-Уссурийской женской учительской семинарии

Т.П. Гордеев и В.Н. Жернаков. Полевые исследования в окрестностях Харбина. 1958 г. Источник: Музей русской культуры в Сан-Франциско

Александра Зиновьевича Федорова (1886–1945) в 1916 г. в Никольск-Уссурийском было основано Южно-Уссурийское отделение Приамурского отдела Русского географического общества (ЮУОРГО). Они же стали инициаторами проведения Первого съезда по изучению Уссурийского края в естественно-историческом отношении, который успешно прошел в Никольск-Уссурийском в апреле 1922 г.

Конкретные причины, заставившие Гордеева в 1922 г. эмигрировать в Китай, назвать трудно: он всегда был вне политики. Возможно, ему захотелось еще раз посетить Харбин, где у него было много друзей. Перед отъездом Гордеев оставил свою библиотеку Уссурийску. Позднее некоторые книги поступили в Центральную научную библиотеку ДВО РАН. Вместе с другими беженцами Гражданской войны ботаник попал в Шанхай, откуда через Тяньцзинь прибыл в Харбин. Там учебный отдел КВЖД пригласил его на преподавательскую работу, а знакомые помогли в организации ботанического сада при Старо-Харбинском опытном поле КВЖД. Вскоре по приезде Гордеев с энтузиазмом участвовал в организации Общества изучения Маньчжурского края (ОИМК), в котором его избрали товарищем председателя подсекции ботаники. Его научные интересы сосредоточились на почвенно-флористических исследованиях в полосе отчуждения КВЖД [8].

Продолжая сочетать преподавание с практикой, Гордеев выступил с идеей открыть Сунгарийскую речную биологическую станцию. 22 ноября 1923 г. в докладе на заседании секции естествознания ОИМК он отмечал: «Река Сунгари, как и остальные реки материковой части Восточной Азии, до сих пор систематически не изучалась, и во всем Китае не открыто еще ни одной речной биологической станции. Между тем Сунгари орошает совершено своеобразный физико-географической район, в состав которого входят и лёссовые степи, и горные хребты, покрытые тайгой, и потому как сама река, так и ее фауна и флора представляют огромный интерес для различных отраслей естествознания» [9, с. 2].

Политика вновь внесла коррективы в жизнь Т.П. Гордеева: за отказ взять советский паспорт работа на КВЖД оказалась под запретом. Его уволили, и он стал преподавать в эмигрантских школах (гимназия Христианского союза молодых людей (ХСМЛ), реальное училище Гуан-хуа, гимназия имени Ф.М. Достоевского и Алексеевское реальное училище) [6]. Гордеев вел занятия по естествознанию, географии и краеведению, регулярно совершая поездки по Маньчжурии для исследований и сбора коллекций. «За этот период, – вспоминали его ученики, – Тарас Петрович воспитал несколько тысяч русских юношей и девушек. Преподавал он свои любимые предметы в нескольких средних школах, везде создавая кружки любителей природы, с которыми дополнительно занимался во внешкольное время. Беженские школы только начинали вставать на ноги. В них не было буквально никаких пособий, и Тарас Петрович со своими юными энтузиастами на скромные средства, собранные среди учеников, работал над изготовлением наглядных пособий и моделей, чем с годами обогатил школьные музеи. Одновременно он ввел практические занятия в школьных садах» [10].

Закрыли и ОИМК, после чего его члены предприняли попытку вновь объединиться и 11 апреля 1929 г. создали при ХСМЛ Клуб естествознания и географии с целью «привлечь к исследовательской работе новых научных сотрудников и ознакомить широкие круги населения с природой и жизнью нашего края – Северной Маньчжурии» [11, с. 15]. Изучая древнюю историю Китая, члены клуба совершили ряд научно-познавательных экскурсий по старинным городам Маньчжурии. В мае 1936 г. под руководством Т.П. Гордеева и Ипполита Гавриловича Баранова молодежь осмотрела древние храмы Ачена, а в сентябре во время экскурсии, организованной Гордеевым и геологом-палеонтологом Алексеем Марковичем Смирновым, были найдены интересные палеонтологические экспонаты, представленные затем на Выставке предметов художественной старины и редкостей (Харбин, 1936 г.). На ней Тарас Петрович организовал историческую секцию, где демонстрировались и другие археологические находки. Всего за первые десять лет работы клуба было проведено 314 заседаний и сделано 570 докладов на различные научные темы, включая биологические [12, с. 51].

Русские исследователи в Харбине всячески культивировали увлечение краеведением среди молодежи. Естествознание и другие регионоведческие дисциплины преподавали во всех русских учебных заведениях Маньчжурии. В 30-е годы XX в. харбинскую молодежь, интересующуюся природой, культурой и историей Китая, объединяла Секция молодых археологов, натуралистов и этнографов Союза национальной молодежи при Бюро российских эмигрантов в Маньчжурии (БРЭМ), созданная в июле 1935 г., в работе которой участвовал и Гордеев. С весны 1936 г. секция имела собственное помещение, в котором проходили доклады и выставки. Регулярно проводились научные поездки,

Т.П. Гордеев в своем кабинете в Харбинском краеведческом музее. 1962 г. Источник: частная коллекция

Памятник на могиле Т.П. Гордеева. Источник: частная коллекция

экскурсии и экспедиции, по результатам которых делались доклады. Собранный материал хранился в собственном музее. Секция издавала свои труды, имелась и небольшая библиотека.

В 1926 г. Гордеев начал комплексное изучение зависимости растительности и почв, проводя исследования в окрестностях Харбина. В 1934 г. он принял участие в экспедиции Н.К. Рериха в район Барги [13, с. 4–6]. Собранные материалы были обобщены в работе «Почвы и растительность Маньчжурии. 1934–1942» (Харбин, 1942 г.). Известно, что Гордеев помогал советами и личным участием русским переселенцам, принудительно отправленным японскими властями в необжитые места.

После окончания Второй мировой войны русские покидали Маньчжурию в массовом порядке, и научно-просветительские организации в Харбине стали закрываться. Клуб естествознания и географии ХСМЛ прекратил работу в начале 1946 г., и те исследователи, что еще оставались в Китае, в 1946 г. основали Харбинское общество естествоиспытателей и этнографов, ставшее последним русским научным объединением в этом городе. Китайские власти закрыли его в 1955 г., но Общество успело выпустить несколько работ, в том числе «Список растений окрестностей г. Харбина» (1955 г.), подготовленный Т.П. Гордеевым, А.И. Барановым, В.И. Кузьминым, Б.В. Скворцовым и Чжан Юй-ляном. Список содержал 736 названий растений и план их распространения.

Дипломатический конфликт между СССР и КНР во второй половине 1950-х гг. заставил задуматься об отъезде из Китая и остававшихся там русских ученых. Т.П. Гордеев оставался там до 1962 г., дожидаясь визы для переезда в Бельгию. Он работал в Харбинском краеведческом музее и ушел на пенсию в возрасте 86 лет, оставив после себя большое количество докладов, статей и книг о маньчжурской природе, многие только в рукописях.

Ветерана изучения природы Дальнего Востока определили в Бельгийский приют для престарелых при женском католическом монастыре в г. Жолимон (Jolimone, Бельгия). Тарас Петрович уже не мог писать из-за склероза. За него вел переписку русский, живший в одной с ним комнате. Тарас Петрович Гордеев скончался 28 апреля 1967 г. [10].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Collection of materials towards biography of T.P. Gordeiev / Ред.-изд. А.И. Баранов. Кембридж, Массачусетс = Cambridge, Mass., 1966. 31 с., библиогр, портр.

2. Жернаков В.Н. Тарас Петрович Гордеев. Окленд (Калифорния), 1974. 46 с.; портр.

3. Фисенко С.М. Роль Александра Зиновьевича Фёдорова в изучении Южно-Уссурийского края (1907–1934 гг.) // Вестн. ДВО РАН. 2014. № 3. С. 136–147.

4. Хисамутдинова Н.В. Русские исследователи как основатели межкультурных коммуникаций России и Китая // Социальные и гуманитарные науки на Дальнем Востоке России. 2010. № 2 (26). С. 143–146.

5. Козлов И. Деятельность Т.П. Гордеева в Приморской области // Сборник материалов к биографии Т.П. Гордеева / Ред.-изд. А.И. Баранов. Кембридж, Массачусетс, 1966. С. 23–24.

6. Авенариус С. О Тарасе Петровиче Гордееве // Друзьям от друзей. Сидней, 1985. № 22 (май). С. 19.

7. Козлов И. Деятельность Т.П. Гордеева в Приморской области: к девяностолетию со дня рождения // Русская жизнь. Сан-Франциско, 1965. 24 февр.

8. Гордеев Т.П. Предварительный краткий отчет о почвенно-флористических исследованиях вдоль линии Китайской Восточной железной дороги в 1926 г. Харбин: Зем. отд. КВЖД, 1926. 11 с.

9. Павлов П.А. Сунгарийская речная биологическая станция // Труды Сунгарийской речной биологической станции. Харбин: Тип. «Полиграф», 1925. Т. 1, вып. 12. С. 2–34.

10. Группа бывших учеников Тараса Петровича Гордеева: памяти русского ученого // Русская жизнь. Сан-Франциско, 1972. 27 апр.

11. Рычкова В. Юбилей Клуба любителей естествознания и географии при ХСМЛ в Харбине // Рубеж. 1939. № 16 (15 апр.). С. 13–15.

12. Клуб естествознания и географии // Натуралист Маньчжурии: сб. / Секция молодых археологов, натуралистов и этнографов Союза национальной молодежи при БРЭМе. Харбин, 1937. С. 51.

13. Упшинский А. Да процветут пустыни!.. Экспедиция академика Н.К. Рериха в степи Барги // Рубеж. 1934. № 43 (20 окт.). С. 4–6: фот.

REFERENCES

1. Baranov A.I. (ed.). Collection of materials towards biography of T.P. Gordeiev. Cambridge, Mass., 1966. 31 p.; bibliogr, portr. (In Russ.).

2. Zhernakov V.N. Taras Petrovich Gordeev. Oklend (Californiya). 1974. 46 p., portr. (In Russ.).

3. Fisenko S.M. Rol' Aleksandra Zinov'evicha Fedorova v izuchenii Yuzhno-Ussuriiskogo kraya (1907–1934 gg.) = [Aleksandr Zinov'evich Fedorov's role in the research of the Ussuri region in 1907–1934]. *Vestnik of the FEB RAS*. 2014;(3):136–147. (In Russ.).

4. Khisamutdinova N.V. Russkie issledovateli kak osnovateli mezhkul'turnykh kommunikatsii Rossii i Kitaya = [Russian researches as the founders of cross-cultural communications of Russia and China]. *Social and Humanitarian sciences in the Russian Far East.* 2010;26(2):143–146. (In Russ.).

5. Kozlov I. Deyatel'nost' T.P. Gordeeva v Primorskoi oblasti = [T.P. Gordeev's work in Primorskaya oblast']. *Collection of materials towards biography of T.P. Gordeiev*. Cambridge, Mass., 1966. P. 23–24. (In Russ.).

6. Avenarius S. O Tarase Petroviche Gordeeve = [About Taras Petrovich Gordeev]. *Druz'yam ot druzei*. Sidnei, 1985:(22):19. (In Russ.).

7. Kozlov I. Deyatel'nost' T.P. Gordeeva v Primorskoi oblasti: K devyanostoletiyu so dnya rozhdeniya = [T.P. Gordeev's work in Primorskaya oblast'; commemorating the 90 anniversary]. *Russkaya zhizn'*. San-Frantsisko, 1965. Febr., 24. (In Russ.).

8. Gordeev T.P. Predvaritel'nyi kratkii otchet o pochvenno-floristicheskikh issledovaniyakh vdol' linii Kitaiskoi Vostochnoi zheleznoi dorogi v 1926 g. = [A brief preliminary report about soil and flora research along the Chinese-Eastren railway in 1926]. Kharbin, 1926. 11 s. (In Russ.).

9. Pavlov P.A. Sungariiskaya rechnaya biologicheskaya stantsiya = [The Sungari river biological station]. *Trudy Sungariiskoi rechnoi biologicheskoi stantsii.* Kharbin: Poligraf, 1925;1(12):2–34. (In Russ.).

10. Gruppa byvshikh uchenikov Tarasa Petrovicha Gordeeva: Pamyati russkogo uchenogo = [Group of former T.P. Gordeev's students. Remembering the Russian scientist]. *Russkaya zhizn'*. San-Frantsisko, 1972. April, 27. (In Russ.).

11. Rychkova V. Yubilei Kluba lyubitelei estestvoznaniya i geografii pri KHSML v Kharbine = [Jubilee of the Club of Lovers for Natural History and Geography by the CUYP in Kharbin]. *Rubezh.* 1939;(16):13–15. (In Russ.).

12. Klub estestvoznaniya i geografii = [Club of Natural History and Geography]. *Naturalist Man'chzhurii.* Kharbin, 1937. P. 51. (In Russ.).

13. Upshinskii A. Da protsvetut pustyni!.. Ehkspeditsiya akademika N.K. Rerikha v stepi Bargi = [Let the deserts flourish! N.K. Rerikh's expedition to the Barga step]. *Rubezh.* 1934;(43):4–6. (In Russ.).

Подписка на журнал «Вестник Дальневосточного отделения РАН» принимается с любого номера Агентством подписки и доставки периодических изданий Урал-Пресс (www.ural-press.ru).

Подписной индекс 70193 в Каталоге периодических изданий «Газеты и журналы» Урал-Пресс.

Полнотекстовые варианты статей можно найти в Интернете:
http://elibrary.ru/issues.asp?id= 2774

Ответственные за номер Г. И. Долгих,
В.В. Богатов
Над номером работали В.С. Жердев,
Л.А. Русова, Н.С. Мун
Компьютерный набор и правка
Г.А. Веренцовой

Адрес редакции:
690091, Владивосток, ул. Светланская, 50, к. 51
Тел. +7(423)222-25-88
E-mail: vestnikdvo@hq.febras.ru
http://www.vestnikdvo.ru

Издатель:
Российская академия наук,
119991, Москва, Ленинский просп., д. 14
Исполнитель по контракту № 4У-ЕП-039-24
ФГБУ «Издательство «Наука»
121099, г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1.
Отпечатано в ФГБУ «Издательство «Наука»
121099, г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1

Подписано к печати 25.07.2024
Дата выхода в свет
Формат 70 x 108 1/16
Усл. печ. л. 14,9
Уч.-изд. л. 19,3
Тираж экз.
Заказ
Цена свободная

Свидетельство Роскомнадзора о регистрации ПИ № ФС 77-75560 от 12.04.2019 г.