

Титов А.В., Шандала Н.К., Исаев Д.В., Новикова Н.Я., Серегин В.А., Семенова М.П., Филонова А.А., Дороньева Т.А., Старинская Р.А., Старинский В.Г., Шлыгин В.В., Ахромеев С.В.

## Исследование радиационной обстановки в районе расположения открытого акционерного общества «30 судоремонтный завод» спустя 30 лет после аварии

ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна», 123098, Москва

**Введение.** Целью работы являлась оценка радиационной обстановки в районе расположения Открытого акционерного общества «30 судоремонтный завод». Исследования проведены в 2014–2016 гг. на территории зоны наблюдения и на территории радиоактивного следа, сформировавшегося после аварии на атомной подводной лодке в 1985 г.

**Материал и методы.** При проведении обследования использовали методы пешеходной гамма-съемки, гамма-спектрометрических измерений радионуклидов на гамма-спектрометре и радиохимического выделения  $^{90}\text{Sr}$  с последующим измерением его активности на радиометрических установках.

**Результаты.** Мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в зоне наблюдения вне радиоактивного следа варьируется от 0,09 до 0,18 мкЗв/ч. Удельные активности  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{235}\text{U}$  в почве не превышают 11, 34 и 5,8 Бк/кг соответственно. Удельная активность  $^{60}\text{Co}$  в почве посёлка Дунай менее 0,42 Бк/кг и не превышает 4,9 Бк/кг на остальной территории зоны наблюдения. Площадь радиоактивного следа, ограниченного изолинией 0,13 мкЗв/ч, не превышает 0,5 км<sup>2</sup>, а изолинией 0,3 мкЗв/ч – 0,0063 км<sup>2</sup>. На территории следа максимальное значение мощности дозы гамма-излучения составляет 0,60 мкЗв/ч. Почвы, загрязнённые аварийными радионуклидами, не относятся к твёрдым радиоактивным отходам. Аварийные радионуклиды мигрировали в почве до глубины 20 см. В настоящее время  $^{137}\text{Cs}$  прочно закреплён в почве. 40–45% активности  $^{60}\text{Co}$  содержится в кислоторастворимой форме. При определённых условиях он может мигрировать в глубь почвы и быть доступен для растений.

**Заключение.** В зоне наблюдения судоремонтного завода, за исключением территории следа радиоактивного загрязнения в результате аварии, радиационная обстановка не отличается от таковой на территории Приморского края. Почва на радиоактивном следе не относится к твёрдым радиоактивным отходам. В дальнейшем улучшение радиационной обстановки на следе будет проходить в основном за счёт физического распада радионуклидов.

**Ключевые слова:** атомные подводные лодки; зона наблюдения; почва; радиационное обследование; гамма-излучение; радиационная авария; твёрдые радиоактивные отходы; удельная активность; утилизация.

**Для цитирования:** Титов А.В., Шандала Н.К., Исаев Д.В., Новикова Н.Я., Серегин В.А., Семенова М.П., Филонова А.А., Дороньева Т.А., Старинская Р.А., Старинский В.Г., Шлыгин В.В., Ахромеев С.В. Исследование радиационной обстановки в районе расположения открытого акционерного общества «30 судоремонтный завод» спустя 30 лет после аварии. Гигиена и санитария. 2020; 99 (7): 674–681. DOI: <https://doi.org/10.33029/0016-9900-2020-99-7-674-681>

**Для корреспонденции:** Титов Алексей Викторович, ст. науч. сотр. ФГБУ «ГНЦ РФ – ФМБЦ им. А.И. Бурназяна». E-mail: [titov\\_fmcb@mail.ru](mailto:titov_fmcb@mail.ru)

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Участие авторов:** концепция и дизайн исследования – Шандала Н.К., Титов А.В.; сбор и обработка материала – Серегин В.А., Филонова А.А., Дороньева Т.А., Старинская Р.А.; статистическая обработка – Шлыгин В.В., Ахромеев С.В., Старинский В.Г.; написание текста – Титов А.В., Исаев Д.В., Новикова Н.Я.; редактирование – Шандала Н.К., Семенова М.П.; утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи – все соавторы.

Поступила 22.04.2019

Принята к печати 25.10.2019

Опубликована 28.08.2020

Aleksey V. Titov, Natalia K. Shandala, Dmitry V. Isaev, Natalya Y. Novikova, Vladimir A. Seregin, Mariya P. Semenova, Anna A. Filonova, Tatyana A. Doroneva, Renata A. Starinskaya, Vitaly G. Starinskiy, Vladimir V. Shlygin, Sergey V. Akhromeev

## Radiation survey around “the 30<sup>th</sup> shipyard” company: 30 years after the accident

State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, 123098, Russian Federation

**Introduction.** The objective of this work was the radiation survey in the vicinity of “The 30<sup>th</sup> Shipyard” Company. The studies were carried out during the period between 2014 and 2016 within the supervision area and in the area of the radioactive trace formed after the accident of 1985 in the nuclear submarine.

**Material and methods.** The following methods were used in the course of the survey: pedestrian gamma surveys, gamma spectrometry measurements of radionuclides using a gamma spectrometer, and radiochemical extraction of  $^{90}\text{Sr}$ , followed by measurement of its activity at radiometric installations.

**Results.** Gamma ambient dose equivalent rate within the supervision area beyond the radioactive trace varies within the range between 0.09 and 0.18  $\mu\text{Sv/h}$ . The specific activities of  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , and  $^{235}\text{U}$  in soil do not exceed 11, 34, and 5.8 Bq/kg, respectively. The specific activity of  $^{60}\text{Co}$  in the soil of the Dunay village is lower 0.42 Bq/kg and does not exceed 4.9 Bq/kg at the rest part of the supervision area. The area of the radioactive trace limited by 0.13  $\mu\text{Sv/h}$  iso-line does not exceed 0.5 km<sup>2</sup>, while that limited by 0.3  $\mu\text{Sv/h}$  iso-line –

0.0063 km<sup>2</sup>. Within the area of the trace, the highest value of the gamma dose rate accounts for 0.60 µSv/h. Soils contaminated with emergency radionuclides do not belong to solid radioactive waste. Emergency radionuclides migrated in soil up to 20 cm depth. Today, <sup>137</sup>Cs is firmly fixed in the soil. 40–45% of <sup>60</sup>Co activity is in acid-soluble form. Under specific conditions, it can migrate deep into the soil and be accessible to plants.

**Conclusions.** Within the supervision area of "The 30th Shipyard" Company, except for the area of the radioactive contamination trace induced by the accident, the radiation situation is the same as that in the area of the Primorskiy Krai. The soil of the radioactive trace does not belong to solid radioactive waste. In the future, the improvement of the radiation situation on the trace will be mainly due to the physical decay of radionuclides.

**Key words:** nuclear submarines; observation area; soil; radiation survey; gamma radiation; radiation accident; solid radioactive waste; specific activity; disposal.

**For citation:** Titov A.V., Shandala N.K., Isaev D.V., Novikova N.Y., Seregin V.A., Semenova M.P., Filonova A.A., Doroneva T.A., Starinskaya R.A., Starinskiy V.G., Shlygin V.V., Akhromeev S.V. Radiation survey around "the 30th shipyard" company: 30 years after the accident. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2020; 99 (7): 674–681. DOI: <https://doi.org/10.33029/0016-9900-2020-99-7-674-681> (In Russian)

**For correspondence:** Alexey V. Titov, MD, senior researcher, State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, 123098, Russian Federation. E-mail: [titov\\_fmcb@mail.ru](mailto:titov_fmcb@mail.ru).

#### Information about the authors:

Titov A.V., <https://orcid.org/0000-0002-3797-2677>; Shandala N.K., <https://orcid.org/0000-0003-1290-3082>; Isaev D.V., <https://orcid.org/0000-0002-9687-628X>; Seregin V.A., <https://orcid.org/0000-0001-9883-1571>; Semenova M.P., <https://orcid.org/0000-0003-0904-0415>; Filonova A.A., <https://orcid.org/0000-0002-0832-2878>; Doroneva T.A., <https://orcid.org/0000-0001-6826-1934>; Starinskaya R.A., <https://orcid.org/0000-0003-1026-3472>; Starinskiy V.G., <https://orcid.org/0000-0003-2587-5041>; Shlygin V.V., <https://orcid.org/0000-0002-1190-9557>; Akhromeev S.V. <https://orcid.org/0000-0002-6564-3045>

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Acknowledgment.** The study had no sponsorship.

**Contribution:** the study conception and design, text writing – Titov A.V.; the study conception and design, editorial revision – Shandala N.K.; text writing – Isaev D.V., Novikova N.Y.; editorial revision – Semenova M.P.; collection and processing of materials – Seregin V.A., Filonova A.A., Doroneva T.A., Starinskaya R.A.; statistical analysis – Starinskiy V.G., Shlygin V.V., Akhromeev S.V.; approval of the final version of the manuscript, responsibility for the integrity of all parts of the manuscript – all co-authors.

Received: April 24, 2019  
Accepted: October 25, 2019  
Published: August 28, 2020

## Введение

Открытое акционерное общество «30 судоремонтный завод» (далее ОАО «30 СРЗ») расположено на полуострове Дунай на побережье бухты Чажма и является градообразующим предприятием посёлка Дунай. Географически бухта Чажма представляет собой составную часть бухты Разбойник и расположена в западном проходе залива Стрелок.

Завод создавался для поддержания технической готовности, включая перегрузку ядерного топлива, надводных кораблей, дислоцированных в бухте Абрек, и атомных подводных лодок (АПЛ) в бухте Павловского.

10 августа 1985 г. на АПЛ К-431 проекта 675, стоявшей в бухте Чажма на ОАО «30 СРЗ» у пирса № 2 третьим корпусом, вследствие нарушения требований ядерной безопасности и технологии при завершении работ по перегрузке реактора левого борта возникла радиационная авария, приведшая к выбросу радионуклидов и образованию радиоактивного следа [1–4]. АПЛ была оснащена двумя реакторами на тепловых нейтронах типа «ВМ-А», мощностью 70 МВт, и обогащением урана в топливе 21% [5].

В первые месяцы после аварии проводилась рекультивация территории ОАО «30 СРЗ» и загрязнённых сооружений. В последующие 10 лет была удалена наиболее загрязнённая часть ближнего радиоактивного следа в районе гравийного карьера. Очищены акватория бухты Чажма у причальной стенки и фарватер. В 2002 г. проведена реабилитация дна озера – котлована и прилегающей к нему территории [6]. На остальной части следа работы по рекультивации не проводились.

Начиная с 2001 г. производственная деятельность завода проводится по следующим направлениям [7]:

- судоремонт военно-морского флота;
- утилизация АПЛ, надводных кораблей и судов;
- коммерческая деятельность (ремонт гражданских судов, оказание услуг).

В основных публикациях о радиационной обстановке в зоне наблюдения (ЗН) ОАО «30 СРЗ» рассматривается территория радиоактивного следа в первые годы после аварии.

Результаты исследований в 1985–1998 гг. приведены в работе [8] и в препринте ИБРАЭ РАН [1].

В последнее время в открытой печати практически отсутствуют публикации о радиационной обстановке на территории полуострова Дунай. Оценки радиационного воздействия аварии в бухте Чажма выполнялись, как правило, расчётным путём [9, 10]. Большинство экспериментальных исследований последствий аварии посвящены радиоактивному загрязнению морской воды, донных отложений и гидробионтов [11–16].

Однако сведения о современном состоянии радиационной обстановки на полуострове Дунай важны не только для ознакомления общественности. Эти сведения необходимы с точки зрения перспектив строительства новых промышленных объектов на территории полуострова [17].

Цель работы – изучение радиационной обстановки на территории ЗН ОАО «30 СРЗ», в том числе на территории аварийного радиоактивного следа, через 30 лет после аварии, перед началом широкомасштабных работ по утилизации надводных кораблей с ядерными энергетическими установками и строительства промышленных объектов.

## Материал и методы

Исследование радиационной обстановки проводили в 2014–2016 гг. на территории ЗН ОАО «30 СРЗ» (рис. 1).

Территория ЗН ОАО «30 СРЗ» условно была разбита на 4 участка:

- территория посёлка Дунай;
- территория радиоактивного следа (дальняя часть следа – расстояние более 1400 м от места аварии);
- территория карьера (ближняя часть радиоактивного следа – здесь после аварии были проведены работы по рекультивации);
- остальная территория.

В процессе исследований проводились измерения:

- мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (далее – МАЭД ГИ);
- удельной активности (УА) радионуклидов в почве.

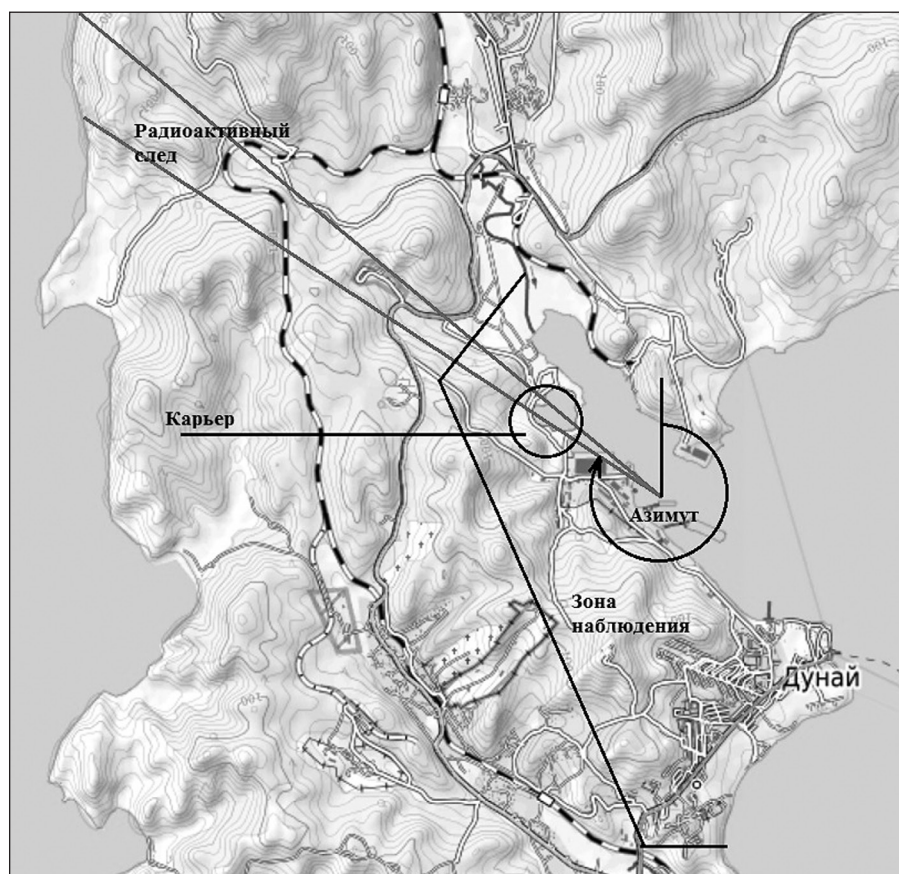


Рис. 1. Зона наблюдения ОАО «30 судоремонтный завод».

Отбор проб почвы проводился с учётом методических рекомендаций по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды<sup>1</sup>.

Точки отбора проб почвы располагали равномерно по площади исследуемой территории на участках с ненарушенным почвенным покровом. Пробы массой 0,5–1 кг отбирали из поверхностного пятисантиметрового слоя.

На территории радиоактивного следа отбор проб почвы проводился на различных расстояниях от места аварии. Для оценки распределения радионуклидов по профилю почвы пробы отбирали из слоев 0–5, 5–10, 10–20 и 20–30 см.

Для измерения УА гамма-излучающих радионуклидов в пробах почвы применяли гамма-спектрометрический метод с использованием полупроводникового гамма-спектрометра

<sup>1</sup> Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды. Под общей редакцией А.Н. Мареев и А.С. Зыковой. Утверждены Главным государственным санитарным врачом СССР 03.12.1979 г. М.: Минздрав СССР, 1980, 335 с.

фирмы «CANBERRA» b10188 с блоком детектирования BE5030. Масса счётного образца, геометрия и время его измерения выбирали таким образом, чтобы погрешность измерения активности  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и  $^{235}\text{U}$  в образце не превышала 10–15%. Если при времени измерения счетного образца до 48 ч требуемую погрешность не достигали, то УА радионуклида приписывали значение «менее минимально-детектируемой активности (МДА)». Значения МДА определялись по методу Курье (расчёт МДА входит в состав программы обработки гамма-спектров на используемом спектрометре).

Определение УА  $^{90}\text{Sr}$  в отобранных пробах проводили на радиометрических установках УМФ-2000 после радиохимического выделения радионуклида в соответствии с МУК 2.6.1.033-2003<sup>2</sup>.

МАЭД Ги на территории исследовали методом непрерывной пешеходной гамма-съемки с помощью портативного спектрометрического комплекса МКС-01А «Мультирад-М», позволяющего проводить измерения с привязкой к географическим координатам с использованием глобальной навигационной системы GPS.

Для исследования форм радионуклидов в почве применяли метод последовательной экстракции Ф.И. Павлоцкой, представленный в работе [18]. Данный метод широко используется как в России, так и за рубежом [19–21].

Легкодоступные (обменные) формы радионуклидов извлекали одномолярным (1М) раствором уксуснокислого аммония. Подвижные радионуклиды (подвижная, кислоторастворимая форма) извлекали 1М раствором соляной кислоты. Фиксированные (прочносвязанные) формы радионуклидов извлекали при обработке почвы 6М раствором соляной кислоты.

## Результаты

Радиационная обстановка на территории зоны наблюдения вне дальней части радиоактивного следа. Результаты статистической обработки измерений МАЭД Ги вне дальней части радиоактивного следа приведены в табл. 1 и на рис. 2 (территория посёлка Дунай).

<sup>2</sup> МУК 2.6.1.033-2003 Стронций-90. Определение концентрации в почве экстракцией моноизооктиловым эфиром метилфосфоновой кислоты иттрия-90. ФР. 1.31.2011.10329. М., 2003 г.

Таблица 1

Мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения на территории зоны наблюдения ОАО «30 судоремонтный завод»

Территория	МАЭД Ги, мкЗв/ч			
	минимальное значение	максимальное значение	среднее значение	стандартное отклонение
Посёлок Дунай	0,084	0,17	0,11	0,011
Территория ЗН (вне дальней части радиоактивного следа), в том числе вдоль границ ОАО «30 СРЗ»	0,078 0,008	0,18 0,12	0,098 0,10	0,01 0,01
Карьер (реабилитированная территория)	0,08	0,17	0,11	0,011



Рис. 2. Мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения на территории посёлка Дунай.

Таблица 2

Удельная активность естественных радионуклидов в почве посёлка Дунай

Территория	Среднее значение УА (диапазон варьирования), Бк/кг		
	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K
МАЭД ГИ > 0,13 мкЗв/ч	64 (30–110)	100 (61–140)	1090 (830–1340)
МАЭД ГИ ≤ 0,13 мкЗв/ч	33 (5–84)	55 (14–130)	720 (390–1130)

На территории с максимальными значениями МАЭД ГИ удельные активности радионуклидов в почве составляли (на 2014 г.):

- по <sup>60</sup>Co (2100–3100) Бк/кг;
- по <sup>137</sup>Cs (21–44) Бк/кг;
- по <sup>90</sup>Sr (6–12) Бк/кг;
- по <sup>235</sup>U (18–64) Бк/кг.

Зависимости отношений УА <sup>60</sup>Co, <sup>90</sup>Sr и <sup>235</sup>U к УА <sup>137</sup>Cs в почве на различных расстояниях от места аварии представлены на рис. 7.

В наиболее загрязнённых частях следа проведены исследования распределения аварийных радионуклидов по профилю почвы, результаты которых показаны в табл. 4.

Таблица 3

Удельная активность радионуклидов в почве (диапазоны значений)

Территория	Диапазон значений УА, Бк/кг			
	<sup>90</sup> Sr	<sup>60</sup> Co	<sup>137</sup> Cs	<sup>235</sup> U
Посёлок Дунай	0,6–11	< 0,42	< 0,3–34	2,0–5,3
Территория ЗН (вне радиоактивного следа), в том числе:	0,23–9,8	0,26–6,6	0,53–4,2	0,34–5,8
вдоль границ ОАО «30 СРЗ»	0,23–4,7	0,46–4,9	0,59–2,4	1,3–3,4
карьер (реабилитированная территория)	< 0,33–8,1	< 0,40–3,4	0,53–24	0,62–5,8

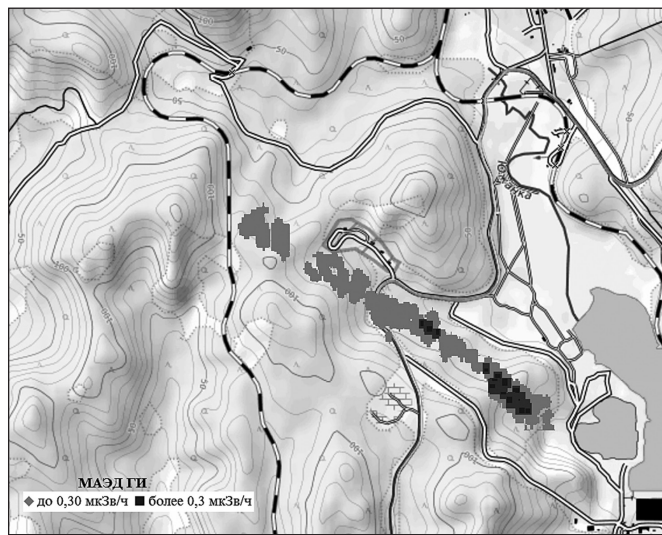


Рис. 3. Мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения на территории радиоактивного следа.

В пробах, отобранных в этих точках, исследовались также формы нахождения радионуклидов в почве (табл. 5).

**Обсуждение**

На территории ЗН за исключением территории радиоактивного следа, сформировавшегося после аварии на АПЛ, МАЭД ГИ, в основном, не превышали 0,12 мкЗв/ч.

На некоторых локальных участках, в том числе на территории посёлка Дунай и в районе карьера, значения МАЭД ГИ достигали 0,18 мкЗв/ч. Повышенные уровни МАЭД ГИ в посёлке в основном обусловлены излучением естественных радионуклидов, содержащихся в горных породах в местах их выхода на поверхность почвы (см. табл. 2).

На территории ЗН имеются также участки с повышенными уровнями УА в почве. Максимальное значение УА <sup>137</sup>Cs (34 Бк/кг) имело место в посёлке Дунай возле электрической подстанции.

На реабилитированной территории в районе карьера УА <sup>137</sup>Cs достигало 24 Бк/кг.

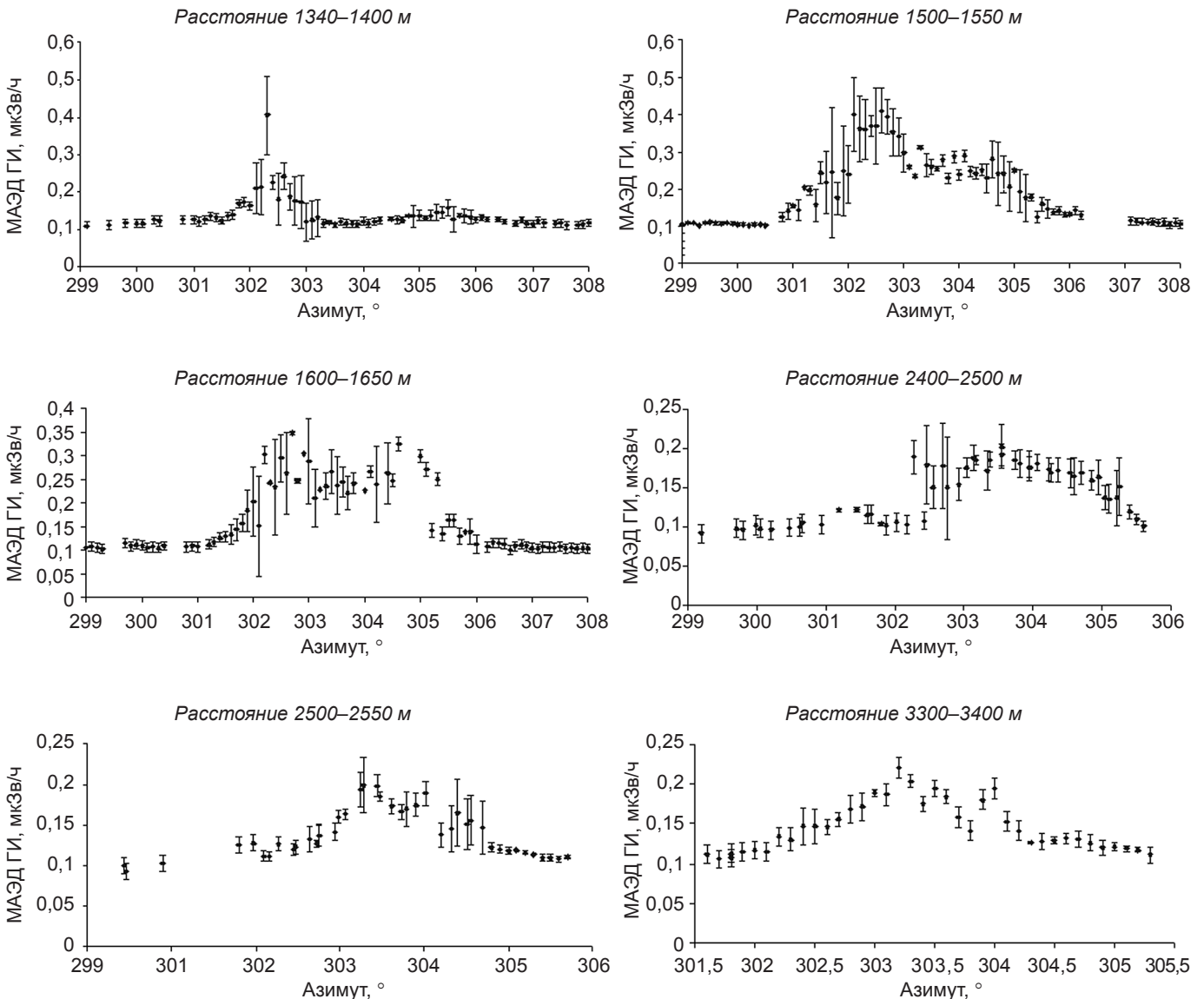


Рис. 4. Мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения в поперечных сечениях радиоактивного следа (среднее по диапазону расстояний значение и стандартное отклонение).

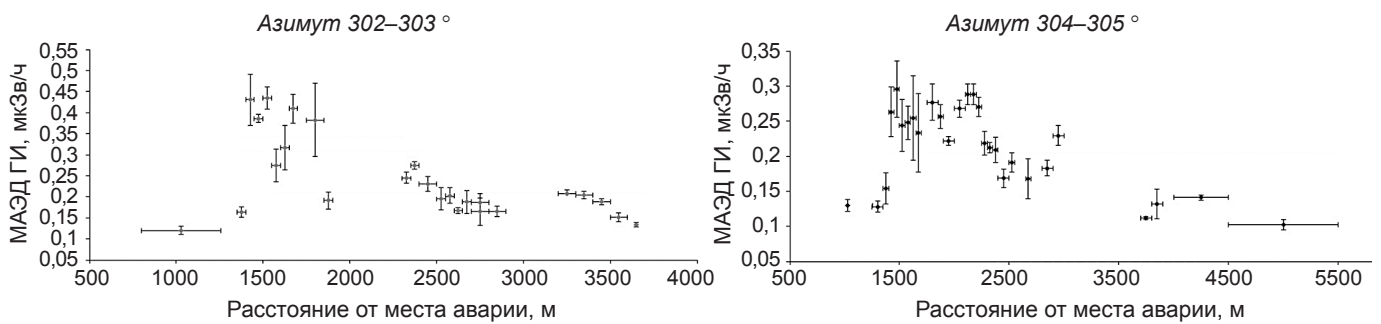


Рис. 5. Мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения на осях радиоактивных следов.

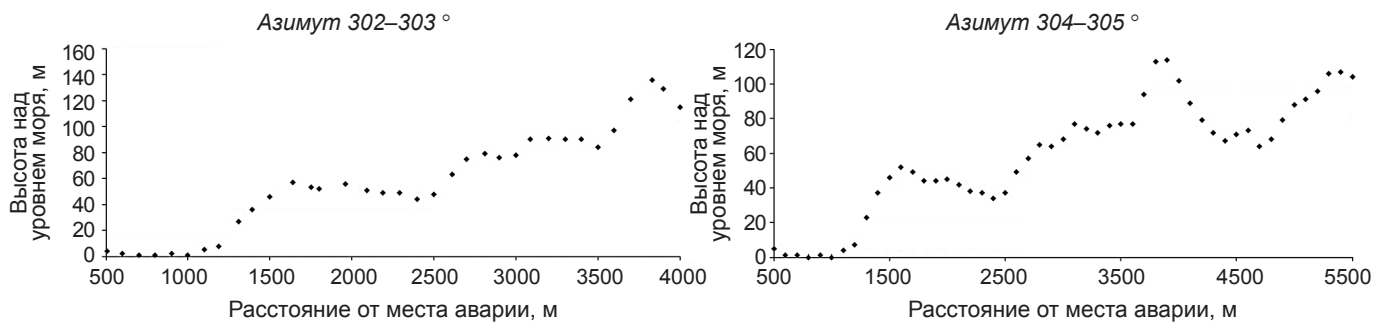


Рис. 6. Рельеф местности вдоль осей радиоактивных следов.

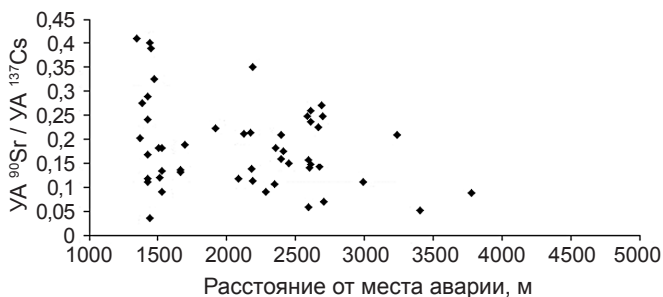
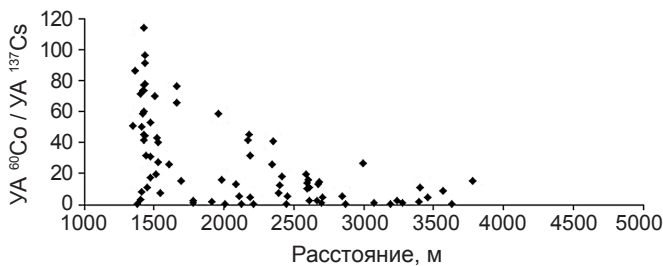
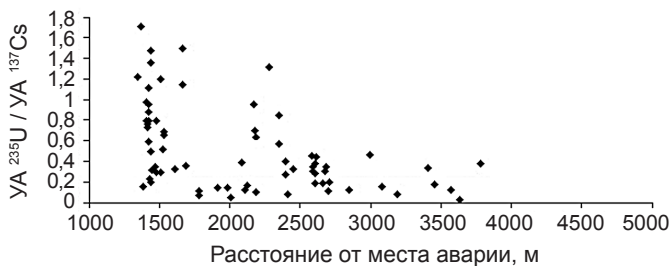


Рис. 7. Отношение удельной активности радионуклидов в почве к удельной активности <sup>137</sup>Cs на различных расстояниях от места аварии.

Таблица 4

Распределение удельной активности радионуклидов по профилю почвы

Слой почвы, см	УА радионуклида, отн. ед.			
	<sup>60</sup> Co	<sup>137</sup> Cs	<sup>235</sup> U	<sup>90</sup> Sr
0–5	1	1	1	1
5–10	0,65	0,82	0,69	0,87
10–20	0,15	0,24	0,31	—
20–30	0,0008	0,0066	0,12	< 0,28

Таблица 5

Формы радионуклидов в почве

Слой почвы, см	Форма	Доля от валового содержания в слое почвы, %	
		<sup>60</sup> Co	<sup>137</sup> Cs
0–5	Обменная	0	0
	Кислоторастворимая	42,5	0,53
5–10	Обменная	0	5,6
	Кислоторастворимая	45,1	2,2
10–20	Обменная	0,004	0,15
	Кислоторастворимая	43,0	0

Такие уровни УА существенно ниже критериев отнесения почвы к твёрдым радиоактивным отходам (ТРО) (10 000 Бк/кг по  $^{137}\text{Cs}$ )<sup>3</sup>.

В отличие от территории посёлка, в почве которого  $^{60}\text{Co}$  не регистрировали (значения УА были ниже МДА, равного 0,4 Бк/кг), в почве вдоль границ ОАО «30 СРЗ» и на карьере УА  $^{60}\text{Co}$  достигала 60,6 Бк/кг. УА  $^{235}\text{U}$  в почве на этих территориях варьировалась в пределах от 0,34 до 5,8 Бк/кг.

Данные, полученные при проведении исследования, показывают, что почти за 50 лет деятельности судоремонтного завода на территории ЗН за исключением радиоактивного следа, сформированного при аварии на АПЛ, радиационная обстановка находится в пределах вариации естественного радиационного фона, характерного для Приморского края, которая в соответствии с [14, 22] характеризуется следующими параметрами:

- МАЭД ГИ от 0,08 до 0,25 мкЗв/ч;
- УА  $^{137}\text{Cs}$  в почве от 3 до 10 Бк/кг;
- УА  $^{90}\text{Sr}$  в почве от 5 до 12 Бк/кг.

Повышенные уровни параметров радиационной обстановки сохраняются на нерекультивированной территории радиоактивного следа.

На образовавшемся непосредственно после аварии радиоактивном следе протяжённостью до 10 км на первых трёх километрах показатели гамма-излучения имели значения 0,15–0,05 мГр/ч (15–5 мР/ч). Ширина достигала 1,5 км. Через 10 сут активность понизилась в 100–1000 раз [1]. В 1990–1991 гг. территория следа, пересекающего полуостров Дунай от бухты Чажма до Уссурийского залива, с уровнями более 15 мкГр/ч имела ширину 300–500 м [1, 17] и площадь около 2,5 км<sup>2</sup>. На оси следа максимальное значение мощности дозы гамма-излучения составляло  $6 \pm 2$  мкГр/ч (4–8 мкЗв/ч) [1].

Через 30 лет после аварии площадь следа, ограниченного изолинией 0,13 мкЗв/ч (фоновое значение МАЭД ГИ плюс три стандартных отклонения), составляет около 0,50 км<sup>2</sup>, а выше 0,3 мкЗв/ч – 0,0063 км<sup>2</sup>. На наиболее загрязнённом локальном участке на расстоянии 1340–1400 м от места аварии (склон сопки) значения МАЭД ГИ варьировались от 0,25 до 0,60 мкЗв/ч.

МАЭД ГИ на расстояниях до 2500 м от места аварии в основном формируется за счёт гамма-излучения  $^{60}\text{Co}$ .

Как отмечается в работах [1, 9], при аварии 10 августа 1985 г. на АПЛ произошли две вспышки самопроизвольной цепной реакции взрывного типа. Высота выбросов радиоактивных веществ была около 50–60 м. При перемещении радиоактивного облака, образовавшегося при аварии, происходило его дробление при столкновении с сопкой, а также «фильтрация» радиоактивности лесным массивом. Это привело к образованию радиоактивных пятен, неравномерно распределённых по ширине и вдоль следа.

Как видно из данных, приведённых на рис. 4, сформировавшийся после аварии след можно представить как наложение двух следов с осями, имеющими азимуты (302–303)<sup>0</sup> и (304–305)<sup>0</sup> (по-видимому, это следы от выбросов при первом и втором взрывах). По направлению распространения выбросов оси следов приближаются или расходятся.

На расстояниях 1400–1500 м выбросы столкнулись со склоном ближней сопки высотой около 60 м. На склоне этой сопки сформировалось загрязнение почвы с максимальным содержанием аварийных радионуклидов. На склонах других сопкок по следу перемещения облака также наблюдаются повышенные значения МАЭД ГИ (см. рис. 5, 6).

Исследования радионуклидного состава проб почвы показали, что радиационная обстановка на следе в настоящее время определяется наличием в почве  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{235}\text{U}$ . Измеренные УА аварийных радионуклидов свидетельствуют о том, что даже на наиболее загрязнённых участках их значения существенно ниже критериев отнесения почвы к ТРО (10 000 Бк/кг для  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и 100 000 Бк/кг для  $^{90}\text{Sr}$ ).

Как видно из приведённых на рис. 5 графиков, отношение УА  $^{60}\text{Co}$  и  $^{235}\text{U}$  к УА  $^{137}\text{Cs}$  в почве снижается с удалением от места аварии, а отношение УА  $^{90}\text{Sr}$  к УА  $^{137}\text{Cs}$  остаётся практически постоянным. Это свидетельствует о том, что скорость осаждения частиц, содержащих  $^{60}\text{Co}$  и  $^{235}\text{U}$ , была выше, чем в случае частиц, содержащих  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

За время, прошедшее после аварии, снижение МАЭД ГИ на радиоактивном следе происходило не только за счёт физического распада радионуклидов, но и в результате их миграции в почве. В 2014 г. основная часть активности аварийных радионуклидов сосредоточена в поверхностном 10-сантиметровом слое почвы (см. табл. 4).

В настоящее время процесс миграции радионуклидов в почве существенно снизился. В соответствии с представленными в табл. 5 данными через 30 лет после аварии более 90% активности  $^{137}\text{Cs}$  прочно зафиксировано в почве.

Кобальт более подвижен: доля кислоторастворимого  $^{60}\text{Co}$  во всех слоях находится на одинаковом уровне – 42–45%, поэтому при определённых условиях он может мигрировать по профилю почвы и быть доступен для растений.

## Заключение

В 2014–2016 гг. были проведены исследования радиационной обстановки в ЗН ОАО «30 СРЗ». В многочисленных публикациях, относящихся к данному региону, основное внимание уделялось загрязнению на территории радиоактивного следа и особенно загрязнению акватории бухты Чажма, которые произошли в 1985 г. в результате аварии на АПЛ. Отмечается также малочисленность данных о радионуклидном составе выпадений.

Исследования, проведённые через 30 лет после аварии, охватывают не только радиоактивный след на всём его протяжении, но и остальную территорию ЗН, включая посёлок Дунай.

Полученные результаты важны не только для информирования общественности, но и в плане перспектив строительства промышленных объектов на территории полуострова.

Эти данные могут рассматриваться в качестве «фоновых» перед началом широкомасштабных работ по утилизации судов атомного флота на заводе.

Результаты исследования показали, что на территории ЗН за исключением «дальнего» следа от радиационной аварии радиационная обстановка находится в пределах вариации естественного радиационного фона, характерного для Приморского края.

На реабилитированной территории карьера («ближний» след) имеются отдельные участки с остаточным содержанием аварийного  $^{60}\text{Co}$ . Участки с содержанием  $^{60}\text{Co}$  в почве обнаружены на ближайших к карьере территориях. По-видимому, это загрязнение произошло при проведении работ по реабилитации. УА  $^{60}\text{Co}$  в почве не превышает 6,6 Бк, а почва с учётом других техногенных радионуклидов не относится к ТРО.

Исследования на всём протяжении радиоактивного следа на полуострове Дунай (проведено более 8500 измерений МАЭД ГИ, в 100 пробах почвы определены УА аварийных радионуклидов в почве) позволили получить подробное описание следа, УА аварийных радионуклидов на различных расстояниях от места аварии. Полученные результаты позволяют прогнозировать изменение радиационной обстановки в будущем.

<sup>3</sup> Правительство Российской Федерации. Постановление от 19 октября 2012 г. № 1069. О критериях отнесения твёрдых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов (с изменениями на 4 февраля 2015 г.).

## Литература

(п.п. 15, 19–21 см. References)

1. Арутюнян Р.В., Данилян В.А., Высоцкий В.В., Гичев Д.В., Киселев В.П., Максимов А.А. и соавт. *Анализ и оценка радиоэкологических последствий ядерной аварии в бухте Чажма*. М.; 1998.
2. Саркисов А.А., Высоцкий В.Л. Ядерная авария на атомной подводной лодке в бухте Чажма. Реконструкция событий и анализ последствий. *Вестник Российской академии наук*. 2018; 88(7): 599–618. DOI: <http://doi.org/10.31857/S086958730000083-9>
3. Сивинцев Ю.В., Высоцкий В.Л., Данилян В.А. Радиоэкологические последствия радиационной аварии на атомной подводной лодке в бухте Чажма. *Атомная энергия*. 1994; 76(2): 158–60.
4. Сивинцев Ю.В. Число делений при аварии 1985 г. на атомной подводной лодке в бухте Чажма. *Атомная энергия*. 2000; 89(3): 256–64.
5. Военное обозрение. Атомные подводные лодки с крылатыми ракетами. Проект 675 (Echo-II class). Available at: <http://topwar.ru/19495-atomnye-podvodnye-loodki-s-krlyatymi-rocketami-proekt-675-echo-ii-class.html>
6. Высоцкий В.Л. Научно-технические и нормативно-правовые проблемы создания системы обращения со слабоактивными отходами в северо-западном регионе России. *Бюллетень «Вопросы утилизации АПЛ»*. 2008; (1): 37–61. Available at: <http://flot.com/publications/issues/utilization/1-Visockii.pdf>
7. Годовой отчет открытого акционерного общества «30 судоремонтный завод» – 2013 год. Available at: <http://www.e-disclosure.ru/portal/files.aspx?id=28649&type=2>
8. Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Васильев А.П., Высоцкий В.Л., Губин А.Т., Данилян В.А. и соавт. *Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию. Радиоэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря* ("Белая книга-2000"). М.; 2005.
9. Богатов С.А., Киселев А.А. Моделирование распространения радионуклидов при аварии в бухте Чажме с учетом полидисперсности и топографии местности. *Атомная энергия*. 2012; 112(4): 233–6.
10. Сойфер В.Н., Горячев В.А., Гуренцов В.И., Макаров В.Г., Сергеев А.Ф. Численные расчеты переноса радионуклидов в атмосфере и морской среде и оценка последствий ядерной аварии в бухте Чажма Японского моря. *Метеорология и гидрология*. 2001; (4): 17–32.
11. Сойфер В.Н. *Радиоэкология северного шельфа Японского моря*. Владивосток: Дальнаука; 2002.
12. Сойфер В.Н., Данилян В.А., Малкин С.Д., Чайковская Э.Л. Современный взгляд на радиационное состояние водной среды северной части Японского моря. *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. 1997; (4): 86–104.
13. Сойфер В.Н., Горячев В.А., Сергеев А.Ф., Астахов А.С., Дударев О.В., Макаров В.Г. и соавт. Эволюция радиоактивного загрязнения донных отложений в зоне аварии на атомной подводной лодке в 1985 г. в бухте Чажма Японского моря. *Метеорология и гидрология*. 1999; (1): 48–63.
14. Чайковская Э.Л., Высоцкий В.Л. Закономерности формирования радиационной обстановки на территории Приморского края. *Атомная энергия*. 2001; 91(3): 223–7.
15. Антипов С.В., Ахунув В.Д., Биладенко В.П., Высоцкий В.Л., Гичев Д.И., Дианский Н.А. и соавт. *Радиоэкологические последствия эксплуатации и утилизации объектов атомного флота в Дальневосточном регионе*. М.; 2010.
16. Кондратьев И.И., Лишавский С.С. Радиоактивное загрязнение полуострова Дунай (Приморский край) в свете перспектив строительства промышленных объектов на его территории. *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. 2017; (4): 96–4.
17. Павлоцкая Ф.И. *Миграция радиоактивных продуктов глобальных выпадений в почвах*. М.: Атомиздат; 1974.
22. Администрация Приморского края. Доклад об экологической ситуации в Приморском крае. Владивосток; 2012.

## References

1. Arutyunyan R.V., Danilyan V.A., Vysotskiy V.V., Gichev D.V., Kiselev V.P., Maksimov A.A. et al. *Analysis and Assessment of Radiological Consequences of Nuclear Accident in Chazhma Bay [Анализ и оценка радиоэкологических последствий ядерной аварии в бухте Чажма]*. Moscow; 1998. (in Russian)
2. Sarkisov A.A., Vysotskiy V.L. Nuclear accident on an atomic submarine in the Chazhma bay. Reconstruction of events and analysis of consequences. *Vestnik rossiysskoy akademii nauk*. 2018; 88(7): 599–618. DOI: <http://doi.org/10.31857/S086958730000083-9> (in Russian)
3. Sivintsev Yu.V., Vysotskiy V.L., Danilyan V.A. Radio-ecological consequences of the radiation accident in the nuclear submarine at Chazhma Bay. *Atomnaya energiya*. 1994; 76(2): 158–60. (in Russian)
4. Sivintsev Yu.V. The number of divisions in the accident of 1985 in a nuclear submarine at the Chazhma Bay. *Atomnaya energiya*. 2000; 89(3): 256–64. (in Russian)
5. Military review. Nuclear submarines with cruise missiles. Project 675 (Echo-II class). Available at: <http://topwar.ru/19495-atomnye-podvodnye-loodki-s-krlyatymi-rocketami-proekt-675-echo-ii-class.html> (in Russian)
6. Vysotskiy V.L. Scientific, engineering, regulatory and legal problems of establishing system for very low-level waste management in the north-west of Russia. *Byulleten' «Voprosy utilizatsii APL»*. 2008; (1): 37–61. Available at: <http://flot.com/publications/issues/utilization/1-Visockii.pdf> (in Russian)
7. Annual report of «The 30 Shipyard» Company – 2013. Available at: <http://www.e-disclosure.ru/portal/files.aspx?id=28649&type=2> (in Russian)
8. Sivintsev Yu.V., Vakulovskiy S.M., Vasil'ev A.P., Vysotskiy V.L., Gubin A.T., Danilyan V.A. et al. *Technogenic Radionuclides in the Seas Washing Russia. Radioecological Consequences of Radioactive Waste Disposal in the Arctic and Far East Seas ("White Paper-2000") [Tekhnogennye radionuklidy v moryakh, omyvayushchikh Rossiyu. Radioekologicheskie posledstviya udaleniya radioaktivnykh otkhodov v arkticheskie i dal'nevostochnye morya ("Belaya kniga-2000")]*. Moscow; 2005. (in Russian)
9. Bogatov S.A., Kiselev A.A. Simulation of radionuclide spreading during an accident in Chazhma Bay, taking into account polydispersity and terrain orography. *Atomnaya energiya*. 2012; 112(4): 233–6. (in Russian)
10. Soyfer V.N., Goryachev V.A., Gurentsov V.I., Makarov V.G., Sergeev A.F. Numerical calculations of radionuclide transport in the atmosphere and in marine environment and assessment of the consequences of a nuclear accident in Chazhma Bay of the Sea of Japan. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2001; (4): 17–32. (in Russian)
11. Soyfer V.N. *Radioecology of the Northern Shelf of the Sea of Japan [Radioekologiya severnogo shel'fa Yaponskogo morya]*. Vladivostok: Dal'nauka; 2002. (in Russian)
12. Soyfer V.N., Danilyan V.A., Malkin S.D., Chaykovskaya E.L. Advanced view on the radiation conditions of the aquatic environment of the northern part of the Sea of Japan. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk*. 1997; (4): 86–104. (in Russian)
13. Soyfer V.N., Goryachev V.A., Sergeev A.F., Astakhov A.S., Dudarev O.V., Makarov V.G. et al. Evolution of radioactive contamination of bottom sediments in zone of the nuclear accident of 1985 in the Chazhma bight of the Sea of Japan. *Meteorologiya i gidrologiya*. 1999; (1): 48–63. (in Russian)
14. Chaykovskaya E.L., Vysotskiy V.L. Laws of the radiation situation formation in the territory of Primorsky Krai. *Atomnaya energiya*. 2001; 91(3): 223–7. (in Russian)
15. Tkalin A.V., Chaykovskaya E.L. Anthropogenic radionuclides in Peter the Great bay. *J Environ Radioactivity*. 2000; 51(2): 229–38. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0265-931X\(00\)00087-4](http://doi.org/10.1016/S0265-931X(00)00087-4)
16. Antipov S.V., Akhunov V.D., Bilashenko V.P., Vysotskiy V.L., Gichev D.I., Dianskiy N.A. et al. *Radio-Ecological Consequences of the Operation and Disposal of Nuclear Fleet Facilities in the Far Eastern Region [Radioekologicheskie posledstviya ekspluatatsii i utilizatsii ob'ektov atomnogo flota v Dal'nevostochnom regione]*. Moscow; 2010. (in Russian)
17. Kondrat'ev I.I., Lishavskiy S.S. Radioactive contamination of the Dunaj Peninsula (Primorskiy Krai) in the light of the prospects for the construction of industrial facilities in its territory. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk*. 2017; (4): 96–4. (in Russian)
18. Pavlotskaya F.I. *Migration of Radioactive Products of Global Fallouts in Soils [Migratsiya radioaktivnykh produktov global'nykh vypadeniy v pochvakh]*. Moscow: Atomizdat; 1974. (in Russian)
19. Bacon J.R., Daidson C.M. Is there a future for sequential chemical extraction? *Analyst*. 2008; 133: 25–46. DOI: <http://doi.org/10.1039/b711896a>
20. Salbu B. Fractionation of radionuclide species in the environment. *J Environ Radioact*. 2009; 100(4): 283–9. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.12.013>
21. Skipperud L., Salbu B. Sequential extraction as a tool for mobility studies of radionuclides and metals in soils and sediments. *Radiochim Acta*. 2015; 103(3): 187–97. DOI: <http://doi.org/10.1515/ract-2014-2342>
22. Report on the environmental situation in the Primorsky Krai. Vladivostok; 2012. (in Russian)