

## СРАВНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ КОБАЛЬТА В ОРГАНАХ И ТКАНЯХ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ

© 2017

**Сибиркина Альфира Равильевна**, доктор биологических наук, доцент,  
заведующий кафедрой геоэкологии и природопользования

**Лихачев Сергей Федорович**, доктор биологических наук, профессор, декан факультета экологии  
Челябинский государственный университет (г. Челябинск, Российская Федерация)

**Аннотация.** В данной статье представлены результаты сравнительного анализа содержания соединений кобальта в органах и тканях древесных растений сосновых лесов Семипалатинского Прииртышья Республики Казахстан. Исследуемые леса относятся к району сухостепных Прииртышских ленточных боров на песках Иртыша и провинции Прииртышских ленточных боров в ложбинах древнего стока. Исследуемая территория боров характеризуется простым древостоем, образованным деревьями примерно одной высоты (20–25 м), колебание между высотой отдельных деревьев не превышает 10–15%. В древостое видом-эдикатором является сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Встречаются осина обыкновенная (*Populus tremula* L.) и береза повислая (*Betula pendula* Roth.), являющиеся деревьями второй величины, они появились в результате вторичной сукцессии, после пожаров и интенсивной вырубki.

В ходе анализа особое внимание уделялось хвое, поскольку она выполняет ассимилирующую функцию и определяет рост и развитие других органов. Определение соединений кобальта проводили в институте геологии и минералогии (ИГМ СО РАН) (г. Новосибирск) с применением методов атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС).

Расчет биогеохимического круговорота древостоем показал, что масса соединений кобальта, вовлеченных в биогеохимический круговорот общей фитомассой древостоя, составила 0,0090 т/га, фитомассой надземной части дерева – 0,0087 т/га. Состояние древостоя по классификации Крафта соответствует I–III классу жизненности в зависимости от места произрастания, т.е. древостой бора характеризуется достаточно высокой емкостью биологического поглощения соединений кобальта.

Сравнительный анализ накопления соединений кобальта разными видами деревьев показал, что в сравнении с хвоей и ветками *Pinus sylvestris* L. листья и ветки лиственных пород деревьев характеризуются максимальным накоплением соединений кобальта, причем листья *Populus tremula* L. накапливают большее их количество по сравнению с листьями *Betula pendula* Roth.

Исходя из потенциальной биогеохимической подвижности металлов, согласно рядам биологического поглощения, для древесных растений кобальт является элементом сильного накопления, а исходя из показателя биотичности, существенной роли в общем круговороте веществ в лесной экосистеме не играет.

**Ключевые слова:** соединения кобальта; хвоя; листья; ветки; сосновые леса; *Pinus sylvestris* L.; *Populus tremula* L.; *Betula pendula* Roth.; биогеохимический круговорот; фитомасса древостоя; зольность растения; коэффициенты корреляции и корреляционной зависимости; ряды биологического поглощения; классы жизненности по Крафту; классы бонитета; элемент сильного накопления.

### Введение

Семипалатинские боры отнесены к категории ценных лесов, в которую входят леса, уникальные по своему породному составу, продуктивности и генетическим качествам, а также выполняющие особо важные защитные функции в наиболее сложных природных условиях [1]. Общая площадь сосновых лесов Республики Казахстан составляет 832 тыс. га, из которых 545 тыс. га (58%) приходится на ленточные боры Прииртышья. Основной лесообразующей древесной породой является сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.).

Лесной покров постоянно изменяется в результате биологических процессов, в частности роста и развития древесных растений, но в большей степени в результате воздействия антропогенных факторов. Не являются исключением и реликтовые боры Семипалатинского Прииртышья, расположенные на границе крупных промышленных комплексов Восточно-Казахстанской области, которые в той или иной мере причиняют борам определенный экологический ущерб.

### Объект и методика исследования

Исследуемые леса относятся к району сухостепных Прииртышских ленточных боров на песках Ир-

тыша и провинции Прииртышских ленточных боров в ложбинах древнего стока. В ходе исследования пробы отбирались в пяти типах боров: в сухих борах высоких, пологих и средних бугров, в западном и равнинном борах, согласно классификации Л.Н. Грибанова и К.А. Пашковского [2; 3].

Отбор проб производился в 2000–2009 гг. по географической протяженности боров и согласно розе ветров, включая территорию от Бородулихинского района (от Шульбинского водохранилища до села Бородулиха) до села Бегень Бескарагайского района на границе с Павлодарской областью Республики Казахстан; в двух направлениях от города Семей (ранее Семипалатинск) (в районе п. Контрольный и п. Красный Кордон); в селах Долонь и Сосновка Бескарагайского района до границы с Алтайским краем Российской Федерации (зона прохождения следа радиоактивных выпадений ядерных испытаний 1949 года).

Исследуемая территория сосновых лесов характеризуется простым древостоем, образованным деревьями примерно одной высоты (20–25 м), колебание между высотой отдельных деревьев не превышает 10–15%. Возраст древостоя подсчитывали методом годичных колец на пнях спиленных деревьев, в неко-

торых случаях по мутовкам, считая, что первая мутовка у сосны образуется в возрасте трех лет [6]. В древостое видом-эдикатором является сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), семейство сосновые (Pinaceae L.). В большинстве случаев в древостое наблюдались деревья с узкими годичными кольцами, что свидетельствует о неблагоприятных экологических условиях (периодических засухах, морозах, пожарах), исследованные деревья входят в категорию средневозрастные (50–100 лет).

На отдельных участках боров встречаются осина обыкновенная (*Populus tremula* L.) из семейства ивовые (Salicaceae Mirb.) и береза повислая (*Betula pendula* Roth.) из семейства берёзовые (Betulaceae Gray.), являющиеся деревьями второй величины, они появились в результате вторичной сукцессии, после пожаров и интенсивной вырубki. В местах отбора проб березняки обнаружены только в окрестностях г. Семей. Наибольшее количество осиновых колоков обнаружено в Бескарагайском районе (Бегеньский лесхоз), наиболее близко расположенном к реке Иртыш (в 15–20 км).

Инвентаризация лесных насаждений осуществлялась путем наземной ходовой таксации глазомерным и глазомерно-измерительными методами с применением элементов измерительной таксации.

Аналитическим исследованиям подвергались различные органы и ткани сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.): хвоя и побеги разного возраста; внешняя кора (корка, или ретидом), отобранная с южной и северной стороны дерева; древесина (вторичная ксилема с несколькими годичными кольцами прироста, являющаяся вторым крупным блоком центрального цилиндра); шишки второго года жизни ((strobilus) семенной орган голосеменных растений).

Особенное внимание уделялось хвое, поскольку она выполняет ассимилирующую функцию и определяет рост и развитие других органов. При отборе побегов (веток) руководствовались тем, что между хвоей и побегами одного года жизни существует наиболее тесная биохимическая связь, побеги других возрастов брались в совокупности, в частности в одну среднюю пробу были объединены ветки 5–7 лет жизни.

Пробы хвои и побегов разбирали по возрастным фракциям (хвоя – от 1 до 4 лет, побеги от 1 до 7); древесину, корку и шишки высушивали при комнатной температуре и измельчали.

Определение соединений кобальта проводили в институте геологии и минералогии (ИГМ СО РАН) (г. Новосибирск) с применением методов атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС).

Полученные результаты о содержании соединений кобальта органами и тканями *Pinus sylvestris* L. легли в основу расчета его биогеохимического круговорота древостоем сосны в условиях сосновых лесов Семипалатинского Прииртышья. При расчете использовали данные Л.Е. Родина и Н.И. Базилевич [4], согласно которым, наибольшие значения индекса разложения опада в тундре и болотах севера, в хвойных лесах – 10–17, а наименьшие (около 1) – в степях и полупустынях.

Коэффициент биологического поглощения (КБП) рассчитывался как отношение содержания элемента

в золе растений к его валовому среднему содержанию в борových песках. Показатель биотичности элементов рассчитывался как отношение содержания элемента в органах к кларку земной коры [5].

Производительность древостоев оценивали по бонитировочной шкале М.М. Орлова [7; 8]. На исследуемых участках боров дифференциацию деревьев в древостое учитывали согласно классификации Крафта [9].

Важнейшее значение для учета лесосырьевых ресурсов, организации и ведения лесного хозяйства имеет продуктивность древостоев в возрасте спелости, т.е. фитомасса. Расчет фитомассы деревьев сосны обыкновенной производили по формуле  $1/3\pi r^2 h d$ , где  $\pi = 3,14$ ;  $r$  – радиус ствола дерева;  $h$  – высота дерева;  $d$  – плотность древесины ( $d$  – плотность древесины сосны равна  $0,5 \text{ т/м}^3$ ). Для вычисления фитомассы надземной части дерева полученные значения фитомассы ствола из формулы, представленной выше, умножали на поправочный коэффициент 1,4. Показатель плотности древесины сосны обыкновенной, поправочные коэффициенты для вычисления фитомассы надземной части дерева и общей фитомассы дерева взяли из соответствующих таблиц [9; 10].

Полученные экспериментальные данные были обработаны вариационно-статистическими методами, с помощью программы Microsoft Excel.

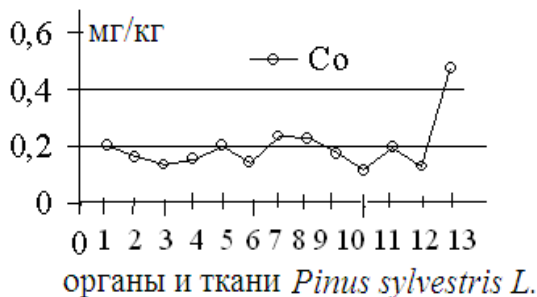
#### Результаты исследования и их обсуждение

Из числа факторов, оказывающих влияние на лесорастительные условия, наиболее существенное значение имеет климат, характеризующийся резкой континентальностью. Летом сюда проникают сухие и горячие ветры, дующие со среднеазиатских пустынь, зимой – арктический холод. Совокупность всех перечисленных отрицательных факторов оказывает неблагоприятное влияние на возобновление и рост древесных растений. В отличие от других хвойных пород сосна обыкновенная имеет большую глубину покоя и меньше повреждается во время зимних оттепелей [11]. В то же время сосна обыкновенная отличается высокой чувствительностью к загрязнениям окружающей среды, что сказывается на продуктивности древостоя.

Из параметров фитоценоза наиболее значимыми считаются параметры древостоя, поскольку именно древостой принимает на себя основную нагрузку, определяя всю последующую циркуляцию элементов в лесной экосистеме, формируя малый круговорот веществ. В ходе исследования было рассчитано, что фитомасса древостоя сосны обыкновенной составляет  $175,84 \text{ т/га}$ ; фитомасса надземной части дерева, включая фитомассу ствола, ветвей, коры, хвои –  $246,18 \text{ т/га}$ .

Количество химических элементов, находящихся в составе массы зрелого фитоценоза, характеризуется емкостью биологического поглощения. При этом роль регуляторного звена принадлежит ассимилирующим органам, в частности хвое, определяющей рост и развитие других органов растения. От величины годичного роста хвои зависит величина биогенного поглощения металлов. В годы, отличающиеся повышенным ростом хвои за один вегетационный период, величина биогенной аккумуляции металлов

хоть и незначительно, но возрастает. Иными словами, под влиянием определенных факторов внешней среды в конкретный момент времени изменяется химический состав не только отдельных органов и тканей растений, но и фитоценоза в целом. Важным показателем интенсивности биогеохимического круговорота является скорость обращения химических элементов, в том числе и соединений кобальта. Данные о содержании соединений кобальта в органах и тканях сосны обыкновенной представлены на рис. 1.



**Рисунок 1** – Распределение соединений кобальта по органам и тканям *Pinus sylvestris* L. 1–4 – хвоя 1–4 года жизни; 5–9 – побеги от 1–4 до 5–7 лет жизни; 10 – корка с южной стороны, 11 – корка с северной стороны дерева; 12 – шишки; 13 – древесина – совокупность годичных колец

Расчет биогеохимического круговорота древостоем показал, что масса соединений кобальта, вовлеченных в биогеохимический круговорот общей фитомассой древостоя, составила 0,0090 т/га, а фитомассой надземной части дерева – 0,0087 т/га.

По показателю продуктивности древостой сосновых лесов соответствует среднему классу бонитета (II–V), который составляет 95% от всех сосновых насаждений, т.е. почвенно-климатические условия вполне обеспечивают произрастание насаждений сосны обыкновенной средней производительности.

Состояние древостоя на исследуемых участках боров по классификации Крафта соответствует I–III классу жизненности в зависимости от местопроизрастания. Полученные результаты позволяют предположить, что древостой бора характеризуется достаточно высокой емкостью биологического поглощения соединений кобальта. На элементный состав органов и тканей *Pinus sylvestris* L. существенное влияние оказывает место отбора, т.е. удаленность от промышленных источников эмиссии (табл. 1), что отражается на интенсивности биогеохимического круговорота соединений кобальта фитомассой древостоя боров, классе бонитета и жизненности деревьев.

Установлено, что в сравнении с хвоей и ветками *Pinus sylvestris* L. листья и ветки лиственных пород деревьев характеризуются максимальным накоплением соединений кобальта, причем листья *Populus tremula* L. накапливают большее количество соединений кобальта по сравнению с листьями *Betula pendula* Roth. В побегах первого года жизни содержание соединений кобальта у *Populus tremula* L. выше, чем у *Pinus sylvestris* L., наименьшее – у *Betula pendula* Roth.

Определенным депо по отношению к соединениям кобальта служит корка деревьев, характер накоп-

ления металла в ней может зависеть от параметров микроклимата. Так, зольность корки с южной стороны у *Pinus sylvestris* L. и у *Populus tremula* L. примерно в 1,2 раза больше, чем с северной стороны, а содержание соединений кобальта с южной стороны, наоборот, меньше, чем с северной: для *Pinus sylvestris* L. в 1,7 раза, для *Populus tremula* L. в 1,3 раза. По сравнительной интенсивности поглощения соединений кобальта древесные породы располагаются в ряду: *Populus tremula* L. > *Pinus sylvestris* L. > *Betula pendula* Roth. [12].

**Таблица 1** – Среднее содержание соединений кобальта в *Pinus sylvestris* L. по пунктам отбора, мг/кг сухого вещества

Место отбора	Co
В районе с. Бегень, n = 30	$0,21 \pm 0,01$ (73,52) 0,12–0,29
В районе с. Бегень, n = 10 (горельник 2007 г.)	$0,22 \pm 0,01$ (76,21) 0,08–0,66
В районе с. Долонь, n = 30	$0,16 \pm 0,01$ (77,63) Сл.-0,19
В районе с. Сосновка, n = 35	$0,18 \pm 0,01$ (78,51) 0,06–0,25
В районе г. Семей, n = 40	$0,22 \pm 0,01$ (77,36) 0,02–0,35
Бородулихинский район, n = 30	$0,16 \pm 0,01$ (92,23) Сл. – 0,43
Среднее	$0,19 \pm 0,01$ (79,2%) Сл. – 0,66
Среднее содержание в золе, мг/кг (n=175)	$8,36 \pm 0,48$ (58,31) Сл. – 17,00

Примечание: в числителе –  $\bar{x} \pm m\bar{x}$  (Cv,%), в знаменателе – min-max.

Важным биогеохимическим показателем является зольность растения. Высокие показатели зольности (2,32 при значениях 1,59–2,95) органов и тканей *Pinus sylvestris* L. свидетельствуют о высокой газопоглотительной способности растения, наличии механизмов активной аккумуляции химических элементов не только из почвы, но и из атмосферного воздуха. Рассчитанные коэффициенты корреляции показали, что содержание соединений кобальта в воздушно-сухой массе древесных растений находится в прямой корреляционной зависимости от его содержания в золе, причем у *Pinus sylvestris* L. эта зависимость более выражена, чем у *Populus tremula* L. и *Betula pendula* Roth.

Оценивая среднее содержание соединений кобальта в органах и тканях деревьев, выявлено, что их содержание не превышает ПДК, приведенных в работах Н.В. Лукиной и В.В. Никонова [13], и значительно ниже критических и фитотоксичных значений.

Исходя из потенциальной биогеохимической подвижности металлов, согласно рядам биологического поглощения, для древесных растений кобальт является элементом сильного накопления, а исходя из показателя биотичности, существенной роли в общем круговороте веществ в лесной экосистеме не играет.

**Выводы**

Несмотря на то, что значительная территория сосновых лесов находится в зоне влияния населенных пунктов и промышленных комплексов Восточно-Казахстанской области Республики Казахстан, биогеохимическая оценка их состояния позволяет охарактеризовать почвенно-климатические условия на данной территории как удовлетворительные для произрастания насаждений сосны обыкновенной II–V классов бонитета. Древостой боров характеризуется достаточно высокой емкостью биологического поглощения соединений кобальта, для древесных растений кобальт является элементом сильного накопления, но исходя из показателя биотичности, существенной роли в общем круговороте веществ в лесной экосистеме не играет.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Лазарев А.И. Дары щедрого леса. Алма-Ата: Кайнар, 1990. 304 с.
2. Грибанов Л.Н. Степные боры Алтайского края и Казахстана. М.-Л., 1960. С. 67–69.
3. Пашковский К.А. Возобновление сосны в ленточных борах Прииртышья. Алма-Ата: Наука, 1951. С. 22–28.
4. Родин Л.Е., Базилевич Н.И. Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара. М.-Л.: Наука, 1965. 254 с.
5. Глазовский Н.Ф. Биогеохимический круговорот химических элементов и подходы к его изучению // Биогеохимический круговорот веществ в биосфере. М.: Наука, 1987. С. 56–64.
6. Дунаев Е.А. Деревянистые растения Подмосковья в осеннее-зимний период: методы экологических исследований. М.: МосгорСЮН, 1999. 232 с.
7. Власова Н.П. Практикум по лесным травам. М.: Изд-во Агропромиздат, 1986. 108 с.
8. Тюрин А.В., Науменко Н.М., Воропанов П.В. Лесная вспомогательная книжка. М.-Л., 1956. 532 с.
9. Денисов С.И. Полевая практика по экологии: учебное пособие. Мн.: Университет, 1999. 120 с.
10. Пахарькова Н.В., Калякина О.П., Шубин А.А., Григорьев Ю.С., Пахарьков С.В., Сорокин Г.А. Различия в акклимационных стратегиях сосны обыкновенной и ели сибирской на загрязнение воздушной среды // Хвойные бореальной зоны. 2010. № 3. С. 231–236.
11. Уваров Г.И., Голуусов П.В. Практикум по почвоведению с основами бонитировки почв. Белгород: Изд-во Белгор. гос. ун-та, 2004. 140 с.
12. Сибиркина А.Р. Биогеохимическая оценка содержания тяжелых металлов в сосновых борах Семипалатинского Прииртышья: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 03.02.08. Омск: ОмГПУ, 2014. 38 с.
13. Лукина Н.В., Никонов В.В. Поглощение аэротехногенных загрязнителей растениями сосняков на северо-западе Кольского полуострова // Лесоведение. 1993. № 6. С. 34–41.

## COMPARISON OF COBALT COMPOUNDS CONTENT IN ORGANS AND TISSUES OF WOODY PLANTS

© 2017

**Sibirskina Alfira Raviljevna**, doctor of biological sciences, associate professor,  
head of Geocology and Nature Management Department

**Likhachev Sergej Fedorovich**, doctor of biological sciences, professor, head of Ecology Faculty  
*Chelyabinsk State University (Chelyabinsk, Russian Federation)*

**Abstract.** The paper presents results of a comparative analysis of cobalt compounds content in the organs and tissues of woody plants in pine forests of the Semipalatinsk Irtysh Republic of Kazakhstan. The investigated forests belong to the dry-steppe area of the Irtysh ribbon belt on the sands of the Irtysh and the provinces of the Priirtyshsky belt in the valleys of the ancient runoff. The investigated area of borons is characterized by a simple stand, formed by trees of approximately one height (20–25 m). The fluctuations between the heights of individual trees do not exceed 10–15%. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) is a species – edificator. Aspen (*Populus tremula* L.) and birch pendant (*Betula pendula* Roth.) are trees of the second size. They appeared after fires and intensive deforestation as a result of secondary succession. Particular attention was paid to needles during the analysis. Needles perform an assimilating function and determine the growth and development of other organs. The determination of cobalt compounds was carried out at the Institute of Geology and Mineralogy (IGM SB RAS) (Novosibirsk) using atomic absorption spectroscopy methods. The calculation of the biogeochemical cycle of the stand was carried out. The mass of cobalt compounds involved in the biogeochemical cycle with the total phytomass of the stand was 0,0090 t / ha, and the phytomass of the aboveground part of the tree was 0,0087 t / ha. The state of the stand according to the Kraft classification corresponds to the I–III class of vitality, depending on the site of occurrence. The stand of boron is characterized by high capacity of biological absorption of cobalt compounds. A comparative analysis of the accumulation of cobalt compounds by different types of trees was carried out. Leaves and branches of deciduous trees are characterized by the maximum accumulation of cobalt compounds in comparison with pine needles and *Pinus sylvestris* L. The leaves of *Populus tremula* L. accumulate more cobalt compounds than leaves of *Betula pendula* Roth. According to the series of biological absorption, cobalt is an element of strong accumulation for woody plants, based on the potential biogeochemical mobility of metals. Cobalt does not play an important role in the general circulation of substances in the forest ecosystem, based on the biotic index.

**Keywords:** cobalt compounds; needles; leaves; branches; pine forests; *Pinus sylvestris* L.; *Populus tremula* L.; *Betula pendula* Roth.; biogeochemical cycle; phytomass of stand; ash content of plant; correlation coefficients; correlation dependence; series of biological absorption; classes of vitality Krafta; quality of locality classes; element of strong accumulation.