

Фоновое содержание химических элементов в растениях севера Западной Сибири и его изменение под влиянием нефтегазодобычи

М. Г. ОПЕКУНОВА, А. Ю. ОПЕКУНОВ, С. Ю. КУКУШКИН, И. Ю. АРЕСТОВА, С. А. ЛИСЕНКОВ

Санкт-Петербургский государственный университет
199178, Санкт-Петербург, ВО, 10-я линия, 33/35
E-mail: m.opkunova@mail.ru

Статья поступила 17.08.2023

После доработки 09.10.2023

Принята к печати 12.10.2023

АННОТАЦИЯ

На основе многолетних исследований (1993–2022 гг.) определено содержание химических элементов (Na, K, Ca, Cu, Zn, Fe, Pb, Sr, Zr, Cd, Ni, Co, Cr, Ba, Cd и Mn) в 17 видах растений севера Западной Сибири. Установлен региональный геохимический фон растений-доминантов и дана оценка изменения химического состава растений в районе разработки нефтегазоконденсатных месторождений севера Западной Сибири. Рекомендованы виды-индикаторы ранних трендов трансформации экосистем под влиянием антропогенной нагрузки и ассоциации химических элементов, связанные с различными источниками загрязнения. Показана роль методов фитоиндикации при малозаметных изменениях состояния окружающей среды в условиях газоконденсатных месторождений.

Ключевые слова: химический состав растений, металлы, биоиндикация загрязнения, экологический мониторинг, трансформация природной среды.

ВВЕДЕНИЕ

Разведка и освоение нефтегазоконденсатных месторождений на севере Западной Сибири сопровождаются многосторонним воздействием на природно-территориальные комплексы (ПТК), приводящим к загрязнению и различным механическим нарушениям их компонентов [Солнцева, 1998; Московченко, 2010, 2013; Водяницкий и др., 2013; Лаверов и др., 2016]. Для оценки экологического состояния окружающей среды в труднодоступных районах Арктики, где отсутствуют стационарные посты наблюдения, а уровень антропогенного воздействия носит локальный характер, определение химического со-

става атмосферного воздуха и природных вод для оценки степени трансформации природной среды зачастую является малоэффективным [Опекунов и др., 2012].

Как показывает опыт многолетних исследований (1993–2022 гг.) на территории лицензионных участков (ЛУ) 35 нефтегазоконденсатных месторождений (НГКМ), для определения малозаметных изменений окружающей среды необходимо использование гео- и биоиндикаторов [Опекунова и др., 1998, 2007, 2018; Кукушкин, 2017; и др.]. В условиях сурового климата и высокой заболоченности территории растительные сообщества отличаются слабой восстановительной способностью, что

обусловлено низкой скоростью метаболизма и невысокой активностью биогеохимических процессов [Сысо и др., 2001, 2007; Filler, Shape, 2008; Barnes, Chuvilin, 2009; Капелькина, 2014; Башкин, 2019; Опекунова и др., 2018; и др.]. Даже слабые нарушения природной среды приводят к изменению интенсивности роста и развития растений, структуры и видового состава растительных группировок, что позволяет использовать растения как надежные индикаторы антропогенной трансформации ландшафтов, в том числе малозаметных изменений, происходящих под влиянием человека.

К числу наиболее показательных признаков трансформации ПТК относится химический состав растений, зависящий как от биологиче-

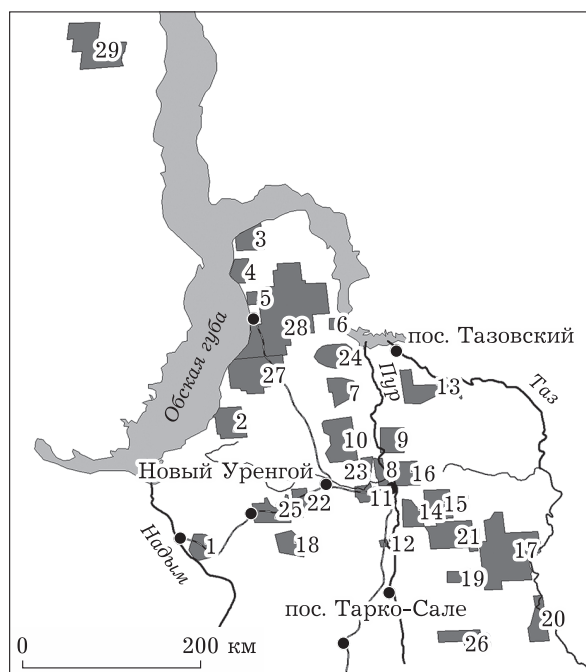


Рис. 1. Карта района исследований

Лицензионные участки: 1 – Надымский; 2 – Западно-Песцовый; 3 – Северо-Парусовый; 4 – Парусовый; 5 – Южно-Парусовый; 6 – Юрхаровский; 7 – Северо-Самбургский; 8 – Западно-Ярояхинский; 9 – Северо-Пуровский; 10 – Самбургский; 11 – Ево-Яхинский; 12 – Пырейный; 13 – Тазовско-Заполярный; 14 – Береговой; 15 – Северо-Часельский; 16 – Яро-Яхинский; 17 – Кынско-Часельский (Кынское, Часельское, Наумовское, Фахировское, Ново-Часельское, Усть-Часельское, Верхне-Часельское НГКМ); 18 – Ямсовейский; 19 – Хадырьяхинский; 20 – Точипылькынский; 21 – Малохадырьяхинский; 22 – Юбилейный; 23 – Восточно-Уренгойский; 24 – Северо-Уренгойский; 25 – Западно-Юбилейный; 26 – Тэрельский; 27 – Харвутинский; 28 – Ямбургский; 29 – Сеяхинский

ских особенностей видов (систематического положения, фенологической фазы, возраста и т. д.), так и от условий окружающей среды (геологического строения, химизма почв, степени доступности элементов растениям и др.) [Brooks, 1981; Markert, 1993; Опекунова, 2013, 2016; и др.]. Химический состав растений значительно варьирует в зависимости от конкретных условий местообитания. При этом существенное влияние оказывают свойства почв и почвообразующих пород, особенности вертикальной и латеральной миграции химических элементов в ландшафте, а также поступление различных поллютантов при антропогенном воздействии. В условиях изменения климата, термификации и усиления оттайки многолетнемерзлых пород (ММП) увеличивается миграция химических элементов и интенсификация их вовлечения в биологический круговорот [Pukalchik et al., 2019; Miner et al., 2021]. Для определения степени трансформации компонентов ландшафтов под влиянием антропогенного загрязнения необходимо знание их химизма в естественных условиях – регионального геохимического фона (РГФ).

Целью настоящей работы стало определение среднего содержания химических элементов (региональных кларков) в широко распространенных видах растений севера Западной Сибири и его изменение под воздействием источников загрязнения объектов нефтегазовых промыслов.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

- определено содержание химических элементов в 17 видах растений, представителях различных жизненных форм: деревьях, кустарниках, кустарничках, травянистых растениях, мхах и лишайниках;
- установлено влияние природных факторов на аккумуляцию химических элементов в естественных условиях;
- выявлены индикаторы антропогенной трансформации химического состава растений под влиянием антропогенного загрязнения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектом исследований стали тундровые, лесотундровые и северотаежные ландшафты на территории НГКМ севера Западной Сибири (Надым-Пур-Тазовское междуречье) (рис. 1).

Полевые работы проводились с использованием методов геоэкологического профилирования и эталонных площадей [Сенькин и др., 2000].

Изучены участки с различной интенсивностью антропогенного воздействия от ненарушенных ПТК тундр, лесотундр и северной тайги до техногенно-трансформированных площадок вблизи объектов инфраструктуры нефтегазовых промыслов (производственных и кустовых площадок, установок комплексной подготовки газа (УКПГ), вахтовых поселков, автозимников, отсыпных дорог, песчаных карьеров). Всего за период 1993–2022 гг. изучено более 1000 пробных площадей (ПП) [Опекунова и др., 1998, 2018, 2019, 2022; Опекунов и др., 2012, 2022; и др.], на которых выполнены комплексные ландшафтно-экологические описания и отбор проб компонентов ландшафта.

Для оценки воздействия нефтегазодобычи на растительность изучен химический состав 17 видов растений, наиболее широко распространенных на территории исследований: деревья – лиственница сибирская *Larix sibirica* Ledeb. (корка) ($n = 107$), кустарники – карликовая березка *Betula nana* L. (листья и ветви) ($n = 33$), ива *Salix lanata* L. (листья) ($n = 12$), кустарнички – толокнянка *Arctous alpina* (L.) Nied. ($n = 11$), толокнянка *Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng. ($n = 6$), водяника *Empetrum subholarcticum* V. N. Vassil. ($n = 30$), багульник *Ledum decumbens* (Ait.) Lodd. ex Steud. ($n = 548$), брусника *Vaccinium vitis-idaea* L. ($n = 197$), голубика *Vaccinium uliginosum* L. ($n = 92$), травянистые растения – морошка *Rubus chamaemorus* L. ($n = 17$), мхи – *Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt. ($n = 29$), *Sphagnum balticum* ($n = 12$) и *Aulacomnium turgidum* (Wahlenb.) Schwägr. ($n = 4$), и лишайники – *Cetraria islandica* (L.) Ach. ($n = 44$), *C. cucullata* (Bellardi) Ach. ($n = 10$), *Cladonia stellaris* (L.) Rubh. ($n = 336$), *C. rangiferina* (L.) F. H. Wigg. ($n = 26$). На антропогенно нарушенных участках изучены щавель курчавый *Rumex crispus* L. ($n = 2$), трехреберник (ромашка) Гукера *Tripleurospermum hookeri* Sch. Bip. ($n = 4$) и крестовник обыкновенный *Senecio vulgaris* L. ($n = 4$), не типичные для зональных тундровых и лесотундровых фитоценозов. Репрезентативность материала обеспечивалась отбором средней пробы, включающей надземную часть 10–25

особей растений с пробных площадей размером 20 × 25 м.

Содержание химических элементов (Na, K, Ca, Cu, Zn, Fe, Pb, Sr, Zr, Cd, Ni, Co, Cr, Ba, Cd и Mn) в почвах и растениях определялось в Центральной лаборатории ВСЕГЕИ им. А. П. Карпинского методом ИСП-МС с полным кислотным разложением проб по ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98. Анализ концентрации их подвижных форм в почвах с использованием ацетатно-аммонийного буфера (рН 4,8) осуществлялся методом ИСП-АЭС в ресурсном центре “Методы анализа состава вещества” СПбГУ (аналитик В. Н. Григорьян).

Для определения зависимости элементного состава растений от физико-химических свойств почв изучены рН потенциометрическим методом ($n = 529$) и гранулометрический состав в опорных почвенных разрезах (легкие, тяжелые почвы и торфяники) пипеточным методом ($n = 52$). Рассмотрено влияние двух основных видов почвообразующих пород: позднеплейстоценовых аллювиально-морских (amIII) и озерно-аллювиальных (laIII) отложений, широко развитых на территории исследований.

Как показал опыт, погодные условия в разные годы могут заметно отличаться друг от друга и влиять на химический состав растений, снижая результативность его использования в экологическом мониторинге. С этой целью изучена зависимость микроэлементного состава от гидрометеорологических условий, проведен анализ сходства/различия средних содержаний микроэлементов, полученных на одних и тех же площадках, но в разные годы. Рассчитан коэффициент корреляции между накоплением металлов индикаторными видами растений и аддитивными показателями концентраций металлов, представляющими собой сумму превышений их содержания над фоновым значением. В рамках исследования обработано две выборки: микроэлементный состав растений в 2017 г. ($n = 68$) и 2018 г. ($n = 36$). Оценка производилась по данным химического состава растений, проанализированных в одной лаборатории, что существенно снизило погрешность. Для оценки достоверности количественных показателей использовались t - и F -критерии.

Статистическая обработка материалов выполнена в программном пакете STATISTICA

28.0 (StatSoft) и включала описательную статистику, парную корреляцию Пирсона, однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) и факторный анализ методом максимума правдоподобия.

Расчет фоновых концентраций металлов в растениях проведен с учетом минимально-аномальной концентрации элемента, по которой устанавливалась аномальная концентрация, обусловленная возможными природными, техногенными причинами или погрешностями при отборе и подготовке проб:

$$X_{\min an} = \bar{x} \pm t \times \delta,$$

где \bar{x} – среднее содержание химического элемента; t – коэффициент Стьюдента; δ – стандартное отклонение.

Величина коэффициента Стьюдента с доверительной вероятностью 0,95 для исследуемых выборок составляет около 2,0. Таким образом, окончательно формула имеет следующий вид: $X_{\min an} = \bar{x} \pm 2\delta$.

Все значения, выходящие за указанные пределы, исключались из расчета региональ-

ного фона, который определялся по “очищенным” выборкам. Это позволило дать обоснование объединения отдельных выборок при расчете РГФ растений для разных ландшафтных условий.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Зольность растений. Одним из важных показателей минерального обмена растений является общее содержание минеральной части (зольности) [Ильин, 1991]. Содержание золы в изученных растениях изменяется в пределах от 0,93 до 5,23 % в зависимости от их систематической принадлежности и условий местообитания (рис. 2). Различия в накоплении минеральных веществ обусловлены биологическими особенностями концентрации химических элементов (межвидовой спецификой и аккумулялирующей способностью отдельных тканей и органов). Так, минимальные величины зольности характерны для лишайников *Cladonia stellaris*, *C. rangiferina*, *Cetraria islandica*, *C. cucullata* и корки листовенни-

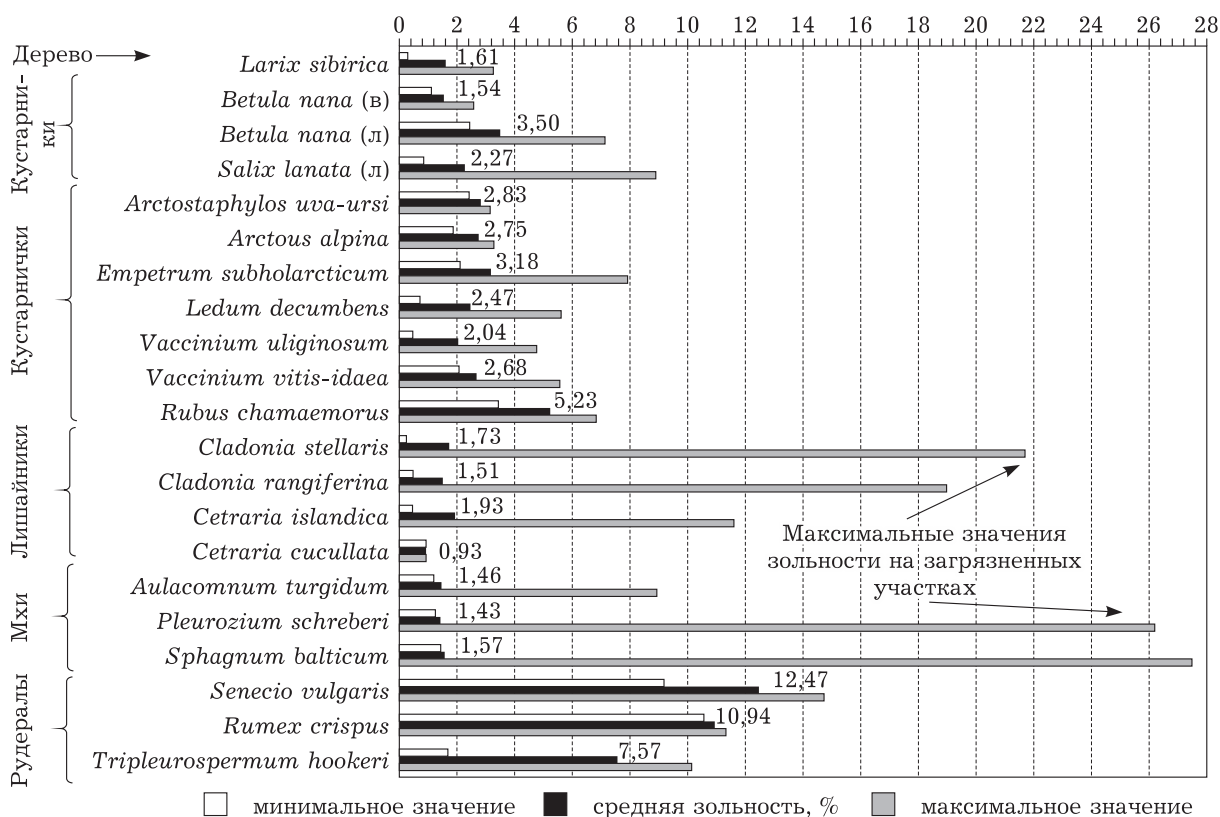


Рис. 2. Изменение зольности растений севера Западной Сибири.

в – ветви; л – листья

цы *L. sibirica*, максимальные – для морошки *Rubus chamaemorus* и листьев ерника *Betula nana*. Среднее содержание минеральной части в листьях *B. nana* более чем в 2 раза превышает ее содержание в ветвях.

Убывающий ряд растений по величине зольности (%) выглядит следующим образом: морошка *R. chamaemorus* (5,23) > карликовая березка *B. nana*, листья (3,50) > водяника *E. subholarcticum* (3,18) > толокнянка *A. uva-ursi* (2,83) > толокнянка *A. alpina* (2,75) > брусника *V. vitis-idaea* (2,68) > багульник *L. decumbens* (2,47) > голубика *V. uliginosum* (2,04) > цетрария *Cetraria islandica* (1,93) > лиственница *L. sibirica* (корка) (1,61) > *Sphagnum balticum* (1,57) > карликовая березка *B. nana* (ветви) (1,54) > *Pleurozium schreberi* (1,43) > лишайники кладония *C. stellaris* (1,73), *C. rangiferina* (1,51) > *C. cucullata* (0,93).

С другой стороны, зольность растений зависит от ландшафтно-геохимических и погодных условий, в том числе общей инсоляции, колебаний температуры, количества осадков и т. д. [Опекунова, 2013], а также отражает уровень химического загрязнения территории, на которой произрастает растение. При росте техногенной нагрузки во всех изученных видах растений отмечено увеличение минеральной части. Так, например, зольность мхов *Sphagnum balticum*, *Aulacomnium turgidum* и *Pleurozium schreberi* резко растет до 10,98; 8,93 и 7,45 % соответственно. Это согласуется с материалами ряда авторов, которые отмечали статистически достоверное повышение зольности растений в черте крупных городов [Каваленова и др., 2001; Тюлькова, 2017; Уфимцева, Терехина, 2017], а также вблизи промышленных объектов [Москаленко, Смирнова, 1990; Давыдова, 2018]. Стоит отметить, что химический состав листьев характеризуется высокой сезонной флуктуацией и во многом зависит от конкретных погодных условий текущего и предшествующего годов. Поэтому общее содержание минеральной части листьев может варьировать в зависимости от сезона, в отличие от коры, зольность которой характеризует поступление поллютантов (и тем самым их накопление) на поверхность растения в течение определенного промежутка времени. Это также согласуется с опубликованными результатами исследований [Ильин, 1991; Бухарина, Двоглазова, 2010].

Наиболее существенные различия по величине зольности установлены в пробах мхов *P. schreberi*, *A. turgidum*, *S. balticum* и лишайников *C. stellaris*, *C. rangiferina*, *C. islandica* (см. рис. 2). Максимальные значения для *S. balticum* и *P. schreberi* зафиксированы, к примеру, на границе разлива шламовых растворов на Ямбургском и Береговом месторождениях. Зольность *S. balticum* и *P. schreberi* составила 27,5 и 26,2 % соответственно, превышая фон в 5–6 раз. Повышенная зольность мхов на загрязненных ПП объясняется безбарьерным типом накопления химических элементов, характерным для бриофитов.

Сходные изменения прослеживаются и в лишайниках. Так, например, на загрязненных участках зольность *C. stellaris* увеличивается в 4–9 раз по сравнению с фоном, а в кустарничках *Vaccinium uliginosum*, *V. vitis-idaea*, *E. subholarcticum* – в 1,5–2 раза.

Высокая зольность характерна для травянистых рудеральных видов, которые встречаются только на антропогенно нарушенных участках и не типичны для зональных тундровых и лесотундровых фитоценозов: щавель курчавый *Rumex crispus* (10,94 %) и крестовник обыкновенный *Senecio vulgaris* (12,47 %).

Региональный геохимический фон растений. Биологические особенности накопления химических элементов в растениях. Расчет РГФ показал (табл. 1), что растения севера Западной Сибири характеризуются низким содержанием металлов, концентрация большинства из них ниже кларка по В. В. Добровольскому [2003] (см. табл. 1, рис. 3). Наряду с этим изученные виды обладают ярко выраженными биогеохимическими особенностями, которые необходимо учитывать при оценке антропогенного воздействия. В индикаторных видах растений установлены элементы высокого, умеренного и низкого уровней накопления с использованием однофакторного дисперсионного анализа содержания химических элементов ($p = 0,05$; критерий Шеффе) (табл. 2). Данный метод позволяет выявлять зависимости и выделять самостоятельные группы экспериментальных данных на основе процедуры сравнения средних значений выборок.

Как показал анализ полученных данных, среднее содержание Ва и Pb в корке лиственницы *L. sibirica* достоверно выше, чем в других

Т а б л и ц а 1
Региональный геохимический фон содержания химических элементов (мг/кг сухого вещества) в растениях-доминантах севера Западной Сибири

Элемент	<i>Betula nana</i>		<i>Ledum descumbens</i> (n = 548)	<i>Vaccinium uliginosum</i> (n = 92)	<i>Vaccinium vitis-idaea</i> (n = 197)	<i>Rubus chamaemorus</i> (n = 17)	<i>Setaria islandica</i> (n = 44)	<i>Cladonia stellaris</i> (n = 336)	<i>Cladonia rangiferina</i> (n = 26)
	Листья (n = 33)	Ветви (n = 33)							
Ba	138±11	41±13	98±3	72±7	70±2	129±82	32±22	15,0±1,3	18±5
Mn	145±12	1032±126	900±32	901±77	1484±42	846±117	68±16	56±4	75±21
Zn	16,9±1,2	117±15	23,3±0,7	42,0±2,5	25,4±0,6	54±10	22,6±1,9	14,6±0,5	16,8±1,7
Cu	3,38±0,17	3,49±0,21	4,76±0,18	7,65±0,59	3,11±0,14	3,96±0,28	1,61±0,26	2,56±0,26	1,59±0,17
Ni	0,89±0,09	2,84±0,45	1,26±0,18	2,76±0,34	0,56±0,04	1,36±0,16	1,05±0,19	0,79±0,04	0,78±0,13
Co	0,14±0,01	0,46±0,12	0,11±0,01	0,13±0,01	0,10±0,01	0,25±0,09	0,28±0,05	0,22±0,02	0,20±0,05
Pb	2,32±0,19	0,16±0,02	0,44±0,02	0,42±0,05	0,40±0,02	0,22±0,12	1,21±0,23	1,36±0,07	1,25±0,18
Cd	0,067±0,005	0,15±0,02	0,030±0,002	0,21±0,03	0,027±0,002	0,45±0,08	0,06±0,01	0,058±0,002	0,06±0,01
Cr	0,54±0,07	0,24±0,07	0,53±0,03	0,49±0,05	0,29±0,02	0,53±0,34	2,65±1,09	1,02±0,09	0,91±0,25
V	0,61±0,06	0,23±0,08	0,48±0,03	0,22±0,03	0,17±0,01	0,25±0,07	1,05±0,21	1,15±0,09	1,04±0,34
Fe	187±27	121±25	111±6	64,5±7,7	66,9±6,9	146±23	367±66	283±20	321±97
Sc	0,06±0,01	0,02±0,01	0,03±0,002	0,013±0,002	0,018±0,002	0,03±0,01	0,12±0,02	0,11±0,01	0,10±0,03
Sr	18,8±2,4	26,7±8,8	7,65±0,31	12,56±1,77	12,5±0,8	41,6±15,6	6,66±1,14	3,69±0,29	8,34±2,54
Na	166±56	105±52	82±3	81±22	42,3±3,8	1162±477	360±40	118±9	198±64
K	424±30	6208±495	3347±60	5406±192	4455±228	11300±1129	2521±131	1020±29	1576±134
Ca	3134±402	4387±243	4308±99	2983±115	4781±114	4972±496	1313±424	472±20	689±166
Зольность	1,61±0,12	3,50±0,29	2,47±0,05	2,04±0,14	2,68±0,05	5,23±0,44	1,93±0,34	1,73±0,11	1,51±0,33

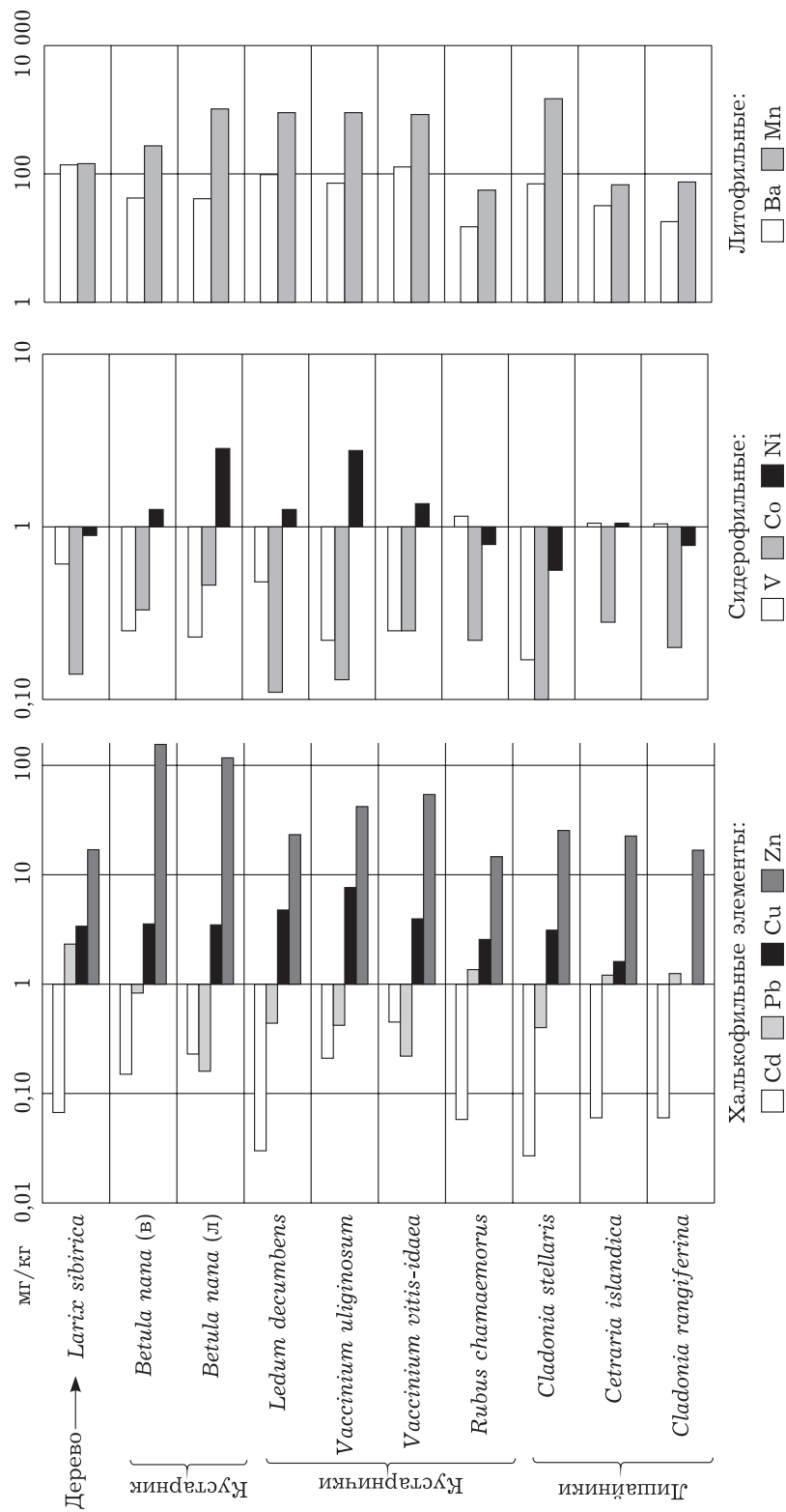


Рис. 3. Среднее содержание химических элементов в изученных растениях.
 в – ветви; л – листья

Интенсивность накопления металлов растениями (по результатам однофакторного дисперсионного анализа, проверка критерия Шеффе)

Растение	Интенсивность накопления		
	высокая	умеренная	низкая
<i>Larix sibirica</i>	Ba, Pb	Ca, Cu, Cr, Fe, Sc, Sr, V	K, Na, Co, Cd, Mn, Ni, Zn
<i>Betula nana</i> , листья	Ca, Co, Ni, Zn	K, Ba, Cd, Cu, Mn, Sr	Na, Cr, Fe, Pb, Sc, V
<i>Betula nana</i> , ветви	Zn	Ca, Ba, Cd, Co, Cu, Ni, Sr	K, Na, Cr, Fe, Mn, Pb, Sc, V
<i>Ledum decumbens</i>	Ca, Ba	Cu, Cr, Mn, Ni	K, Na, Co, Cd, Fe, Pb, Sc, Sr, V, Zn
<i>Vaccinium uliginosum</i>	Cu, Ni	Ca, K, Ba, Cd, Cr, Mn, Zn	Na, Co, Fe, Pb, Sc, Sr, V
<i>V. vitis-idaea</i>	Ca, Mn	Ba, K	Na, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Sc, Sr, V, Zn
<i>Rubus chamaemorus</i>	Ca, K, Na, Ba, Cd, Sr	Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn	Pb, Sc, V
<i>Cetraria islandica</i>	Cr, Fe, Sc, V	Na, Co, Pb	K, Ca, Mn, Cu, Ni, Sr, Cd, Ba, Zn
<i>Cladonia stellaris</i>	Fe, Sc, V	Co, Cr	K, Ca, Na, Ba, Cd, Cu, Mn, Ni, Pb, Sr, Zn
<i>Cladonia rangiferina</i>	Fe, Sc, V	Co, Cr, Pb	Ca, K, Na, Ba, Cd, Cu, Mn, Ni, Sr, Zn

изученных видах растений. Ерник *Betula nana* является концентратором Zn, наряду с этим в его листьях также интенсивно накапливаются Ca, Co и Ni.

Кустарнички в целом характеризуются низкой аккумуляцией Na, Co, Fe, Pb, Sc, Sr, V и хорошо выраженными индивидуальными особенностями накопления других металлов. Брусника *Vaccinium vitis-idaea* выделяется интенсивной концентрацией Mn и Ca и умеренной аккумуляцией K и Ba. Голубика *V. uliginosum* отличается высокой степенью накопления Cu и Ni, умеренной – Ba, Ca, Cd, Cr, K, Mn, Zn. Багульник *Ledum decumbens* интенсивно концентрирует Ba и Ca, умеренно – Cu, Cr, Mn, Ni.

Морошка *R. chamaemorus* среди изученных видов растений выделяется высокой аккумуляционной способностью большинства химических элементов (см. табл. 2); группу низкого накопления образуют только Sc, V и Pb. Для всех лишайников, наоборот, типична низкая концентрация большинства изученных металлов и высокая Fe, Sc и V (в *Cetraria islandica* к ним добавляется Cr). Межвидовые различия отчетливо прослеживаются в группе металлов умеренного накопления: вторую группу в *C. islandica* представляют Co, Pb и Na,

а в *C. stellaris* – Co и Cr, в *C. rangiferina* к ним добавляется Pb.

Видоспецифичность аккумуляции химических элементов в растениях хорошо согласуется с опубликованными в литературе данными. Так, по материалам И. В. Лянгузовой [2016], на фоновой территории Кольского полуострова кратность варьирования содержания Cu и Ni в различных видах растений достигает в среднем 7 раз. Представители рода *Vaccinium* являются типичными концентраторами Mn, вид *Arctostaphylos uva-ursi* наиболее беден всеми зольными элементами, а наибольшее их накопление отмечается в ассимиляционных органах травянистых и листопадных растений.

Значительные различия наблюдаются также в химическом составе отдельных органов и тканей растений. Согласно проведенному анализу, наибольшие средние содержания Ni, Sr, Co, K, Ca, Mn отмечаются в листьях *B. nana*, при этом содержание Ca – в 2 раза, Ni и K – в 3 раза, Mn – в 4 раза выше, чем в ветвях (см. рис. 3). Вместе с тем концентрация Zn и Cd в ветвях березки в 1,5–2 раза выше по сравнению с листьями. Содержание V, Cr и Zr в среднем близки для ветвей и листьев *B. nana*.

Известно, что накопление химических элементов зависит от биохимических процессов, проходящих в тканях растений [Kabata-Pendias, 2011]. Сравнение химического состава проб растений, отобранных в различные временные сроки, свидетельствует о значительных изменениях в уровне содержания металлов при активизации ростовых процессов. Так, например, в июне в начале вегетационного периода содержание элементов биологического захвата Ba и Pb в тундровых растениях выше, чем в июле в период высокой биологической активности, а биогенных Zn и Mn – наоборот, ниже [Опекунова, 2013; Lisenkov, Orekunova, 2021].

ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние условий местообитания на химический состав растений. Основным источником поступления металлов в растения являются горные породы и почвы, сформировавшиеся на них. Мозаичность и комплексность тундровых ПТК определяют неоднородность почвенного покрова, перераспределение, аккумуляцию и миграцию металлов в горизонтальной структуре геохимических ландшафтов [Опекунова и др., 2019]. Вместе с тем изучение особенностей накопления микроэлементов в индикаторных видах *L. decumbens* и *C. stellaris* в зависимости от ПТК показало, что различия содержания металлов в растениях в целом характеризуются небольшой контрастностью. Концентрации элементов в растениях, произрастающих на торфяниках, несколько ниже, чем на почвах типичных тундр. Изучение зависимости накопления химических элементов от гранулометрического (легкие, тяжелые почвы и торфяники) и вещественного (почвообразующие породы) состава свидетельствует, что в багульнике на легких почвах по отношению к тяжелым на статистически значимом уровне отмечается накопление Mn и Zn. При этом по отношению к торфяникам установлено увеличение минеральной части и концентраций Cu, Ni и Cd. На тяжелых почвах в *L. decumbens* выявлено статистически достоверное повышение зольности и накопление Sr по сравнению с растениями торфяников. На торфяниках наблюдается выраженный рост концентрации Pb и Hg по отношению к *L. decumbens*, произ-

растающему на легких почвах, а также Pb – на тяжелых.

В лишайнике *C. stellaris* на легких почвах установлено накопление Cu, Na и Zr по отношению к торфяникам. На тяжелых почвах отмечается рост зольности и содержания Sr и Na по отношению к растениям на торфяниках, а также Sr в сравнении с легкими почвами. На торфяниках *C. stellaris* накапливает на статистически значимом уровне Pb и Cd по отношению к растениям, произрастающим на легких и тяжелых почвах. Установленные закономерности хорошо согласуются с выявленными ранее особенностями аккумуляции химических элементов в различных типах почв севера Западной Сибири [Опекунова и др., 2019].

Исследования показали, что контрастность содержания металлов в растениях на разных почвообразующих породах выше, чем на почвах разного гранулометрического состава. Установлено, что в *L. decumbens* на аллювиально-морских отложениях накапливаются Mn, Zn и Cu по отношению к растениям на озерно-аллювиальных отложениях. В лишайнике *C. stellaris* контрастность концентрации на разных почвообразующих породах снижается. На аллювиально-морских отмечается статистически достоверное накопление Mn, Zn, Cu, Ni и Co, на озерно-аллювиальных и озерных – Fe, Sc, V и Cr.

Влияние нефтегазодобычи на химический состав растений. На участках с высокой техногенной нагрузкой наблюдается изменение химического состава растений. В целом, характерен рост концентрации большинства металлов по сравнению с фоновым содержанием. Изменение химического состава зависит от вида антропогенного воздействия. Индикаторами загрязнения при освоении месторождений (автотранспорт, строительство дорог, объектов инфраструктуры промысла и др.) служат повышенные количества Zn, Ni, Pb, Cd и Co в надземной биомассе растений. Наиболее высокими концентрациями металлов характеризуются лишайники *C. stellaris* и *C. rangiferina*.

Показательно изменение химического состава растений вблизи разливов буровых растворов. Так, максимальное содержание Fe, Na, Ba, Sr, Cu, Zn, Ni, Pb, Cr, V и Co в растениях наблюдается в 100 м от пятна загрязнения.

Для *C. stellaris* при загрязнении шламовыми растворами характерно накопление Na, Ca и Fe на порядок выше, чем на фоновых участках. Отличительной чертой кустарничков *V. uliginosum*, *V. vitis-idaea*, *L. decumbens* и *E. subholarcticum*, привычных концентраторов Mn, является снижение содержания металла при высокой концентрации практически всех химических элементов. Это хорошо согласуется с известным антагонистическим взаимодействием Mn в тканях растений с Cu, Fe, Cr, V, Cd и Pb [Алексеева-Попова, Дроздова, 1996; Kabata-Pendias, 2011; Alexeeva-Popova, Drozdova, 2013]. Интенсивность поступления Cu при этом не меняется, что может быть вызвано присутствием в буровых растворах медьсодержащих присадок. При загрязнении ПТК буровым шламом резко увеличивается концентрация Cr, что, возможно, обусловлено использованием в буровых растворах хром лигносульфоната в качестве пластифицирующей добавки.

Сопряженный анализ химического состава почв и растений при загрязнении буровыми шламами показал, что в качестве индикаторных элементов загрязнения в растениях выступают Fe, Na, Ba, Zn, Sr, Cr и V. Разливы пластовых вод, обогащенных ПАУ, хлоридами и металлами, приводят к резкому скачку содержания в *C. stellaris* практически всех элементов и росту зольности лишайника в 4–5 раз. Наиболее показательное увеличение в биомассе *C. stellaris* содержания Fe и Sc (выше фона в 8 раз), V (в 7 раз), Cr (в 5 раз) и Co (в 4 раза).

В районе УКПГ наблюдается повышенная концентрация Fe, Na, Cr, V и Co в *C. stellaris*, *V. nana*, *L. decumbens* и *E. subholarcticum*, что хорошо согласуется с увеличением валового содержания и подвижных форм этих металлов в почвах [Опекунова и др., 2018]. Максимальная интенсивность поглощения химических элементов характерна для *P. schreberi*, *E. subholarcticum* и листьев *V. nana*. Это указывает на высокие индикаторные свойства названных растений при техногенном загрязнении. Однако их применение на изученной территории ограничено в связи с низким обилием или стеноитностью, что противоречит основным требованиям, предъявляемым к видам-биоиндикаторам [Опекунова, 2016]. Возможность использования листьев широ-

ко распространенной в районе исследований *V. nana* снижена, поскольку химический состав однолетних тканей крайне изменчив под влиянием погодных условий конкретного года.

Индикаторы малозаметных изменений в окружающей среде под влиянием нефтегазодобычи. На исследованной территории широко распространенными видами являются *L. decumbens* и *C. stellaris*, что при хороших индикационных свойствах позволяет использовать изменения их химического состава и отклонение от РГФ в качестве показателя антропогенного воздействия.

Оценка индикаторной значимости выбранных видов растений проведена посредством корреляционного анализа между аддитивными показателями накопления металлов индикаторными видами, отобранными на одних и тех же площадках в разные годы. Установлена достоверная корреляция между суммарной (аддитивной) концентрацией металлов в *L. decumbens* и *C. stellaris* в 2017 г. – $r = 0,37$ (критическое значение $r = 0,24$ при $p = 0,05$), в 2018 г. – $r = 0,58$ (критическое значение $r = 0,32$ при $p = 0,05$). Более высокая достоверность результатов в 2018 г., по-видимому, связана с тем, что основной отбор проб проводился на площадках, подверженных загрязнению, так как сам аддитивный показатель отражает величину превышения над фоновым содержанием.

Аналогичным образом были проведены исследования, направленные на выявление зависимости микроэлементного состава от гидрометеорологических условий, которые в разные годы могут заметно отличаться друг от друга и влиять на химический состав растений, снижая результативность их использования в экологическом мониторинге. С этой целью для каждого индикаторного вида была определена корреляция между содержанием микроэлементов (по аддитивному показателю), полученная на одних и тех же площадках, но в разные годы. Результаты исследований показали наличие связи между концентрациями металлов даже в условиях временной дифференциации. Для *L. decumbens* величина коэффициента корреляции составила $r = 0,43$ (критическое значение $r = 0,30$ при $p = 0,05$). В пробах *C. stellaris* эта связь проявилась в меньшей степени, но на статистически достоверном уровне – $r = 0,49$ (критическое значение $r = 0,42$ при $p = 0,05$).

Для всех изученных ПП, расположенных в северной тайге, типичных и полигональных тундрах, характерны следующие закономерности накопления металлов в *L. decumbens*: в условиях антропогенной нагрузки багульник активно концентрирует литофильные и сидерофильные элементы. Отмеченное ранее увеличение зольности определяется главным образом накоплением Ba, Cr, V, Co, Sr, Fe и Ni. На это указывает достоверная положительная корреляция между этими параметрами. Индикаторами загрязнения служат существенные превышения РГФ: Ni, Cd, Pb и Sr – в 1,5–2,5 раза, Cr, Co, Fe – в 5–7 раз, V и Sc – в 8,5 раза. В лишайнике *C. stellaris* увеличение техногенной нагрузки индицируется высокими концентрациями практически всех изученных металлов. В целом индикатором влияния техногенеза на содержание металлов в растениях служит высокая вариабельность значений.

Результаты факторного анализа методом максимума правдоподобия свидетельствуют (табл. 3), что химический состав *L. decumbens* и *C. stellaris* на изученной территории определяется в основном природными процессами

и, прежде всего, составом почвообразующих пород. Первые факторы, объясняющие 66,8 % (лишайник) и 41,8 % (багульник) дисперсии выборок, отражают химический состав растений на почвах, формирующихся преимущественно на озерно-аллювиальных (озерных) отложениях. Состав этих пород обуславливает накопление в растениях сидерофилов (V, Fe, Co) и литофилов (Sc, Cr). Как отмечалось ранее, накопление этих металлов во многом определяет содержание минеральной части растений, что отражается в высокой нагрузке на этот фактор зольности. Условия произрастания лишайника на территориях с развитием аллювиально-морских отложений отражает второй фактор (вес 9,8 %), багульника – третий фактор (вес 9,6 %). Ведущая ассоциация, индицирующая химизм растений на этих породах, – Cu-Ni-Mn, в меньшей степени – Zn, т. е. металлов, обогащающих эти породы. Различия в роли ведущих факторов по весовым показателям объясняются разным масштабом площадного распространения рассматриваемых четвертичных отложений на изученной территории. Обсуждая природные

Т а б л и ц а 3
Факторная матрица химического состава *C. stellaris* и *L. decumbens*
(коэффициенты нагрузок выведены со значениями > 0,30)

<i>C. stellaris</i>					<i>L. decumbens</i>				
Металл и зольность	Фактор				Металл и зольность	Фактор			
	1	2	3	4		1	2	3	4
Ba	0,47		0,67		Ba		0,90		0,31
Mn		0,69			Mn			0,55	
Zn		0,50	0,61		Zn			0,66	
Cu	0,44	0,72	0,34		Cu			0,68	
Ni	0,64	0,63			Ni				
Co	0,78	0,39	0,35		Co	0,74			
Pb	0,36			0,91	Pb	0,43	0,40		0,81
Cd				0,70	Cd				0,64
Cr	0,77	0,35			Cr	0,72			
V	0,90	0,32			V	0,95			
Fe	0,87	0,30	0,34		Fe	0,95			
Sc	0,83				Sc	0,78			
Sr	0,52		0,75		Sr	0,33	0,37		
Зольность	0,79		0,44		Зольность	0,60	0,41		
Вес, %	66,8	9,8	7,5	5,5	Вес, %	41,8	13,9	9,6	7,8

П р и м е ч а н и е. Метод выделения факторов: метод максимального правдоподобия. Метод вращения: варимакс с нормализацией Кайзера.

факторы формирования химического состава растений, нужно указать на участие торфяников при произрастании растений на заболоченной территории. В обоих случаях – это четвертые факторы с относительно низкими весовыми значениями и с ведущим парагенезисом Cd-Pb.

В структуре главных компонент растений отмечаются техногенные факторы: третий для лишайника (вес 7,5 %) и второй для багульника (вес 13,9 %). Состав парагенетических ассоциаций химических элементов близок между собой и представлен $Sr_{75}Ba_{67}Zn_{61}Z_{44}$ и $Ba_{90}Z_{41}Pb_{40}Sr_{37}$ соответственно (Z – зольность). Причиной загрязнения является, в первую очередь, строительство скважин, на что указывает присутствие Ba и Sr – индикаторов буровых шламов. Исходя из структуры главных факторов, можно сделать вывод о более высокой чувствительности к техногенезу химического состава багульника. Кроме того, загрязнение оказывает определенное влияние на зольность растений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что растения севера Западной Сибири обладают ярко выраженными межвидовыми биогеохимическими особенностями, в том числе способностью к накоплению определенных химических элементов. Это делает весьма спорным возможность использования в геоэкологических исследованиях кларка растений (среднего содержания химических элементов в растительности суши), даже установленного для определенных природных условий. На фоновых территориях тундр и северной тайги химический состав растений определяется химизмом почвообразующих пород и особенностями местообитаний. Рассчитанный в работе региональный геохимический фон растений-доминантов рекомендуется использовать в пределах северных территорий, сложенных осадочной толщей четвертичных отложений разного генезиса.

При техногенном воздействии растения проявляют индикаторные свойства, особенности которых индивидуальны для каждого вида. Показателем антропогенного загрязнения и происходящих нарушений в массовом служит увеличение зольности растений.

Особенно это характерно для мхов и лишайников за счет безбарьерного типа аккумуляции химических веществ. Содержание минеральной части в корке *Larix sibirica* является показателем продолжительного атмосферного загрязнения. В корке *L. sibirica* накапливаются Sc, V, Cr, Sr, которые являются индикаторами аэротехногенного воздействия. Высокими индикационными свойствами при загрязнении почвы, отработанными буровыми шламами, обладают кустарнички *V. uliginosum*, *V. vitis-idaea* и *L. decumbens*, а также *E. subholarcticum*. Являясь типичными концентраторами Mn, в условиях загрязнения его содержание снижается. Багульник *L. decumbens* выступает в роли концентратора Ba и служит надежным индикатором при загрязнении буровыми шламами. Бриофиты за счет безбарьерного типа накопления индицируют загрязнение Ba и Sr, а также Na и K в случае разлива буровых отходов. Виды лишайников *C. stellaris* и *C. rangiferina* являются концентраторами Na, K, Ca и Fe при разливе пластовых вод. Кроме того, лишайники характеризуются повышенными концентрациями V, Sc, Zr, Pb и Zn у факельных установок, а также рядом с УКПГ.

Химический состав растений, расположенных вблизи автодорожной сети, отличается повышением концентрации Pb, Ni, V и Cr. Наиболее контрастно разница проявляется в кустарничке *L. decumbens* (концентрация Ni и Pb в 2 раза выше фоновой) и *C. stellaris* (концентрация V и Cr достигает 1,0 мг/кг при фоновом значении около 0,2).

Вместе с тем многие виды растений за счет стенотопности не могут быть использованы повсеместно на территории исследования. Наиболее распространенными видами, отвечающими требованиям индикаторной значимости, являются *B. nana*, *L. decumbens*, *C. stellaris* и отдельно для торфяников – *R. chamaemorus*. В переувлажненных местообитаниях хорошими индикационными свойствами обладают сфагновые мхи, однако высокое видовое разнообразие и сложность их определения при отборе проб не позволяют проводить биоиндикационные исследования с их использованием.

ЛИТЕРАТУРА

Алексеева-Попова Н. В., Дроздова И. В. Особенности минерального состава растений и почв на ультраоснов-

- ных породах Усть-Бельского горного массива (среднее течение реки Анадырь). II. Растения // Ботан. журн. 1996. Т. 81, № 5.
- Башкин В. Н., Галиулин Р. В., Галиулина Р. А., Арабский А. К. Риск загрязнения почв тяжелыми металлами через газопылевые выбросы // Проблемы анализа риска. 2019. Т. 16, № 1. С. 42–49.
- Бухарина И. Л., Двоглазова А. А. Биоэкологические особенности травянистых и древесных растений в городских насаждениях: монография. Ижевск: Изд-во “Удмуртский университет”, 2010. 184 с.
- Водяницкий Ю. Н., Аветов Н. А., Савичев А. Т., Трофимов С. Я., Шишконокова Е. А. Влияние загрязнения нефтью и пластовыми водами на зольный состав олиготрофных торфяных почв в районе нефтедобычи (Приобье) / Почвоведение. 2013. № 10. С. 1253–1262. [Vodyanitskii Yu. N., Avetov N. A., Savichev A. T., Trofimov S. Ya., Shishkonakova E. A. Influence of oil and stratal water contamination on the ash composition of oligotrophic peat soils in the oil-production area (the Ob' region) // Eurasian Soil Sci. 2013. Vol. 46, N 10. P. 1032–1041].
- Давыдова Н. Д. Биогеохимическая трансформация растительности степей в условиях атмосферного загрязнения // Природа Внутренней Азии. 2018. № 2 (7).
- Добровольский В. В. Основы биогеохимии. М., 2003. 342 с.
- Ильин В. Б. Тяжелые металлы в системе почва–растение. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние. 1991.
- Кавеленова Л. М., Здеговетский А. Г., Огневенко А. Я. К специфике содержания зольных веществ в листьях древесных растений в городской среде в условиях лесостепи (на примере г. Самары) // Химия раст. сырья. 2001. Т. 5, № 3. С. 105–110.
- Капелькина Л. П. Трансформация тундровых экосистем на нефтепромыслах Севера России // Теорет. и прикл. экология. 2014. № 1. С. 49–52.
- Кукушкин С. Ю. Индикаторы антропогенной нагрузки на природно-территориальные комплексы при освоении нефтегазоконденсатных месторождений севера Западной Сибири: дис. канд. геогр. наук / Санкт-Петербургский гос. ун-т. СПб., 2017.
- Лаверов Н. П., Богоявленский В. И., Богоявленский И. В. Фундаментальные аспекты рационального освоения ресурсов нефти и газа Арктики и шельфа России: стратегия, перспективы и проблемы // Арктика экология и экономика 2016. № 2 (22). С. 4.
- Лянгузова И. В. Тяжелые металлы в северотаежных экосистемах России. Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2016. 269 с.
- Москаленко Н. Н., Смирнова Р. С. Геохимическая оценка загрязнения окружающей среды Ленинского района Москвы. Экология и охрана природы Москвы и Московского региона. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 237 с.
- Московченко Д. В. Геохимия ландшафтов севера Западно-Сибирской равнины: структурно-функциональная организация вещества экосистем и проблемы экодиагностики: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. СПб., 2010. 42 с.
- Опекунов А. Ю., Опекунова М. Г., Кукушкин С. Ю., Ганул А. Г. Оценка экологического состояния природной среды районов добычи нефти и газа в Ямало-Ненецком автономном округе // Вестн. СПбГУ. Сер. 7: Геология, география. 2012. № 4. С. 87–101.
- Опекунова М. Г. Биоиндикация загрязнений: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2016. 300 с.
- Опекунова М. Г. Диагностика техногенной трансформации ландшафтов на основе биоиндикации: дис. ... д-ра геогр. наук: 25.00.23. СПб., 2013. 402 с.
- Опекунова М. Г., Арестова И. Ю., Щербаков В. М., Мещеряков В. Г., Ганул А. Г., Кучеров А. В. Тяжелые металлы в растениях Уренгойского Севера // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 7. 1998. Вып. 3 (№ 21).
- Опекунова М. Г., Опекунов А. Ю., Кукушкин С. Ю., Арестова И. Ю. Индикаторы антропогенной нагрузки на природно-территориальные комплексы нефтегазоконденсатных месторождений Ямало-Ненецкого автономного округа // Вестн. Санкт-Петербург. ун-та. Сер. 7. 2007. Вып. 1. С. 124–127.
- Опекунова М. Г., Опекунов А. Ю., Кукушкин С. Ю., Арестова И. Ю. Оценка трансформации природной среды в районах разработки углеводородного сырья на севере Западной Сибири // Сиб. экол. журн. 2018. Т. 25, № 1. С. 122–138. doi: 10.15372/SEJ20180111 [Opekunova M. G., Opekunov A. Yu., Kukushkin S. Yu., Arestova I. Yu. Evaluation of Environmental Transformation in Areas of Hydrocarbon Deposits in the North of Western Siberia. Contemporary Problems of Ecology. 2018. Vol. 11. P. 99–110. doi: 10.1134/S1995425518010109]
- Опекунова М. Г., Опекунов А. Ю., Кукушкин С. Ю., Ганул А. Г. Фоновое содержание химических элементов в почвах и донных осадках севера Западной Сибири // Почвоведение. 2019. № 4. С. 422–439. doi: 10.1134/S0032180X19020114 [Opekunova M. G., Opekunov A. Yu., Kukushkin S. Yu., Ganul A. G. Background contents of heavy metals in soils and bottom sediments in the north of Western Siberia // Eurasian Soil Sci. 2019. Vol. 52. P. 380–395].
- Сенькин О. В., Опекунова М. Г., Щербаков В. М. Ландшафтно-экологическое картографирование и экологическая оценка нарушенных территорий с применением методов биоиндикации: учеб. пособие. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2000.
- Солнцева Н. П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 376 с.
- Сысо А. И. Закономерности распределения микроэлементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 277 с.
- Сысо А. И., Васильев С. В., Смоленцев Б. А., Сеньков А. А. Ландшафтно-геохимический анализ изменения природной среды в районах нефтедобычи // Сиб. экол. журн. 2001. № 3. С. 333–342.
- Тюлькова Е. Г. Зольность растений в условиях городской среды (на примере города Гомеля) // Вестн. Балт. фед. ун-та им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2017. № 1.
- Уфимцева М. Д., Терехина Н. В. Оценка экологического состояния Центрального района Санкт-Петербурга на основе эокофитоиндикации // Вестн. СПбГУ. Науки о Земле. 2017. Т. 62, вып. 2. С. 209–217. doi: 10.21638/11701/spbu07.2017.206
- Alexeeva-Popova N. V., Drozdova I. V. Micronutrient composition of plants in the Polar Urals under contrasting geochemical conditions // Russian Journal of Ecology. 2013. Vol. 44, N 2. P. 100–107.
- Baptista M. S., Teresa M., Vasconcelos S. D., Carbral J. P., Freitas C. M., Pacheo A. M. G. Copper, nickel, lead in lichens and tree bark transplants over different period of time // Environ. Pollut. 2008. Vol. 151 (2). P. 408–413.

- Barnes D. L., Chuvilin E. Migration of Petroleum in Permafrost Affected Regions // *Soil Biol.* 2009. Vol. 16. P. 263–278.
- Bashkin V. N. *Modern Biogeochemistry: Environmental Risk Assessment*, 2d Edition. Springer Publishers, 2006. 444 p.
- Brooks J. Organic matter in meteorites and Precambrian rocks: clues about the origin and development of living systems // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. Mathemat. and Phys. Sci.* 1981. Vol. 303. P. 595–609.
- Filler D., Snape I., Barnes D. (Eds.). *Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons in Cold Regions*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*, fourth ed. CRC Press, Boca Raton, 2011.
- Lisenkov S., Opekunova M. Exploiting of bioindication methods in assessing the impact of oil and gas production on Tundra landscapes on the example of the Yam-burg oil and gas condensate deposit // *Topical issues of rational use of natural resources XVII international forum-contest of students and young researchers under the auspices of UNESCO: scientific conference abstracts*, 2021.
- Markert B. *Plants as Biomonitors: Indicators for Heavy Metals in the Terrestrial Environment*. VCH Publishers Ltd., 1993.
- Miner K. R., D'Andrilli J., Mackelprang R., Edwards A., Malaska M. J., Waldrop M. P., Miller C. E. Emergent biogeochemical risks from Arctic permafrost degradation // *Nature Climate Change*. 2021. Vol. 11. P. 809–819.
- Opekunov A., Opekunova M., Kukushkin S., Lisenkov S. Impact of drilling waste pollution on land cover in a high subarctic forest-tundra zone // *Pedosphere*. 2022. Vol. 32 (3). P. 414–425. doi: 10.1016/s1002-0160(21)60083-8
- Opekunova M., Opekunov A., Kukushkin S., Lisenkov S., Vlasov S., Somov V. Soil Pollution with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Petroleum Hydrocarbons in the North of Western Siberia: Spatial Pattern and Ecological Risk Assessment // *Eurasian Soil Sci.* 2022. Vol. 55. P. 1647–1664. doi: 10.1134/s1064229322110102
- Pukalchik M. A., Terekhova V. A., Karpukhin M. M., Vavilova V. M. Comparison of Eluate and Direct Soil Bioassay Methods of Soil Assessment in the Case of Contamination with Heavy Metals // *Eurasian Soil Sci.* 2019. Vol. 52, N 4. P. 464–470. doi: 10.1134/S1064229319040112.

Background content of chemical elements in plants of the north of Western Siberia and its change under the influence of oil and gas production

M. G. OPEKUNOVA, A. Yu. OPEKUNOV, S. Yu. KUKUSHKIN, I. Yu. ARESTOVA, S. A. LISENKOV

*St. Petersburg State University
199178, St. Petersburg, 10th line of Vasilevsky island, 33/35
E-mail: m.opekunova@mail.ru*

Based on long-term research (1993–2022), the content of chemical elements (Na, K, Ca, Cu, Zn, Fe, Pb, Sr, Zr, Cd, Ni, Co, Cr, Ba, Cd, and Mn) has been determined in 17 plant species of the northern West Siberia region. The regional geochemical background of dominant plant species has been established, and an assessment of changes in the chemical composition of plants in the area of oil and gas condensate field development in the northern West Siberia region has been provided. Indicator species reflecting early trends in ecosystem transformation under the influence of anthropogenic load and associations of chemical elements linked to various sources of pollution have been recommended. The role of phytoindication methods has been demonstrated in detecting subtle changes in the environmental state in the conditions of gas condensate field sites.

Key words: plant chemical composition, metals, pollution bioindication, ecological monitoring, natural environment transformation.