

Использование методов биоиндикации и биотестирования в оценке экологического состояния территории газоконденсатных месторождений севера Западной Сибири

М. Г. Опекунова, А. Ю. Опекунов, И. Ю. Арестова,
С. Ю. Кукушкин, В. В. Спасский, М. А. Никитина,
Е. Ю. Елсукова, Н. А. Шейнерман, И. С. Недбаев

Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9,

Для цитирования: Опекунова М. Г., Опекунов А. Ю., Арестова И. Ю., Кукушкин С. Ю., Спасский В. В., Никитина М. А., Елсукова Е. Ю., Шейнерман Н. А., Недбаев И. С. Использование методов биоиндикации и биотестирования в оценке экологического состояния территории газоконденсатных месторождений севера Западной Сибири // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2018. Т. 63. Вып. 3. С. 326–344. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.305>

В ходе экологического мониторинга на территории лицензионных участков (ЛУ) Ямало-Ненецкого Автономного Округа (ЯНАО) выявлены вещества-индикаторы загрязнения окружающей среды отходами бурения — одного из основных источников техногенного воздействия. Установлено, что при сбросе пластовых вод наиболее выражена индикаторная значимость фенола, хлоридов, Na^+ и Ba^{2+} . В буровом шламе отмечено высокое содержание хлоридов, нефтяных углеводородов (НУ), Cu, Sr и Ba. Для оценки экологического состояния природной среды на территории газоконденсатных месторождений применен комплекс методов, включающих определение химического состава почв и растений и биотестирование водных вытяжек почв с использованием тест-объектов *Chlorella vulgaris* и *Daphnia magna*. Определено содержание тяжелых металлов (Zn, Cd, Cu, Sr, Fe, Mn, Cr, Pb, Ba, Co и Ni) в восьми видах растений. Выявлены индикаторы ранних трендов трансформации экосистем под влиянием антропогенной нагрузки, к которым отнесены *Ledum decumbens* и *Cladonia stellaris*. Установлена сходимость результатов биотестирования с содержанием загрязняющих веществ в почвах и растениях. Показана роль биологических методов индикации при малозаметных изменениях состояния окружающей среды в условиях газоконденсатных месторождений.

Ключевые слова: биоиндикация, биотестирование, загрязнение, тяжелые металлы, газоконденсатное месторождение, север Западной Сибири.

1. Введение

В связи с активным освоением газовых и газоконденсатных месторождений севера Западной Сибири экосистемы этого региона подвергаются загрязнению и геомеханическому воздействию на растительность и почвы. Хотя при этом уровень химического загрязнения существенно ниже, чем при разработке нефтяных место-

* Работа выполнена при поддержке гранта РГО-РФФИ № 17-05-41070.

рождений, оно приводит к малозаметным изменениям окружающей среды, которые плохо фиксируются при помощи существующих методов локального мониторинга. Для последнего отсутствует унификация подходов и методик работы: не учитываются производственная специфика и, главное, региональные особенности и различия природно-территориальных комплексов (ПТК). Кроме того, используемые методики наблюдений не всегда имеют достаточные обоснование и апробацию. Как результат, существующие в настоящее время порядок, принципы и методы выполнения локального мониторинга в ряде случаев оказываются неэффективны.

В мировой практике экологического мониторинга наземных экосистем разработано множество методов и приемов биоиндикации. Оформились направления, основанные на использовании приоритетных групп микроорганизмов, водорослей, растений и животных. При этом применяются два подхода в оценке реакции организмов на воздействие окружающей среды:

- 1) на основе реакции видов и их сообществ, распространенных на исследуемой территории (Bargagli, et al., 2002; Adamo, et al., 2008; Markert, et al., 2012; Macedo-Miranda, et al., 2016; Опекунова, 2016, и др.);
- 2) на основе реакции тест-объектов, размещенных в испытываемой среде (Terekhova, 2011; Lors, 2011; Бардина и Чугунова, 2012; Ribe, 2012, и др.).

Применение биотестирования считается перспективным для оценки токсичности буровых растворов (Рыбина, 2004; Светличная, 2004; Капелькина и др., 2013). Вместе с тем применение их при мониторинге экологического состояния северных экосистем в районах добычи газа и газоконденсата требует унификации подходов и методов, разработки комплекса взаимозаменяемых методик, позволяющих проводить исследования в условиях меняющейся интенсивности антропогенного воздействия.

Таким образом, целью проводимых исследований стала оценка возможности и необходимости практического применения биоиндикации и биотестирования при экологическом мониторинге на территории газоконденсатных месторождений Ямало-Ненецкого Автономного Округа (ЯНАО), в том числе получение объективной информации для пополнения Единого государственного фонда данных о состоянии и загрязнении окружающей среды.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) выполнен мониторинг состояния абиотических компонентов окружающей среды территории восьми лицензионных участков (ЛУ) на основе физико-химических методов исследования;
- 2) изучены растительные сообщества и определен химический состав растений, широко распространенных в тундровых экосистемах;
- 3) проведены экспериментальные исследования загрязнения почв с использованием биомаркеров;
- 4) выполнен сопряженный анализ результативности химических, физико-химических и биологических методов оценки техногенного загрязнения компонентов окружающей среды;
- 5) предложены биоиндикационные критерии выявления малозаметных изменений экологической ситуации.

2. Материалы и методы

Биоиндикационные методы для оценки интенсивности антропогенной нагрузки при добыче углеводородов отрабатывались летом 2017 г. на территории восьми газоконденсатных месторождений ЯНАО (рис. 1). В ходе этих исследований изучено содержание ряда тяжелых металлов (ТМ) — Mn, Cr, Pb, Zn, Cd, Cu, Ba, Co, Sr, Fe, Sc, Hg и Ni) в компонентах окружающей среды — воде, донных отложениях, почвах и растениях. Принятый комплекс методов биоиндикации основан на существующих представлениях об уровнях организации живого вещества (ген — клетка — орган — вид — популяция — сообщество) и согласуется с мнением о необходимости проведения сопряженного анализа с абиотическими показателями среды обитания и применения в качестве тест-культур для экспрессных анализов представителей трех основных звеньев трофической цепи биогеоценозов: продуцентов, консументов, редуцентов (Махам, 2000; Ahtiainen, 2002; Terekhova, 2011; Ribe, 2012).



Рис. 1. Расположение исследованных ЛУ месторождений

Работы проводились на основании требований, предъявляемых к мониторинговым исследованиям, с учетом природных условий участков. Пикеты на профиле устанавливались по мере смены фаций на всех уровнях элементарного геохимического ландшафта: элювиальном, трансэлювиальном, субаквальном и аквальном. Исследования выполнялись на контрольных (находящихся под прямым воздействием источника загрязнения), условно-контрольных (под потенциальным воздействием источника загрязнения) станциях мониторинга (СМ) и в пределах фоновых территорий. На каждой СМ описывались ПТК; обследовались расположенные вблизи водные объекты; отбирались для химического анализа пробы поверхностных вод, донных отложений, почв и растений.

Образцы донных отложений взяты из поверхностного слоя (0–3 см). Пробоотбор почв осуществлялся методом конверта из двух генетических горизонтов (аккумулятивного горизонта О (Т) и иллювиального горизонта В (ВГ)) в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01—83. В торфяниках образцы торфа брались с глубины 5–10 см и 20–25 см.

В качестве основных параметров для оценки состояния ПТК принимались видовой состав и строение фитоценоза. Для этого на каждой пробной площади (20 × 25 м) проводилось детальное геоботаническое описание растительности по стандартной методике (Полевая..., 1976).

Для выявления особенностей накопления поллютантов разными видами растений на СМ отбирались дикорастущие растения, известные как хорошие индикаторы загрязнений. Это представители различных жизненных форм: лишайник — *Cladonia stellaris* (Opiz) Pouzar & Vezda, багульник — *Ledum decumbens* (Ait.) Lodd. ex Steud., лиственница — *Larix sibirica* Ledeb. Дополнительно проведены исследования индикаторной роли 6 видов растений, распространенных на территории месторождений: *Vaccinium uliginosum* L., *Vaccinium vitis-idaea* L., *Empetrum nigrum* L., *Betula nana* L., *Cetraria delisei* (Bory) Th. Fr., *Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt.

Всего изучено 139 пробных площадок, дана их детальная экологическая характеристика, отобраны 74 пробы воды, 53 пробы донных отложений, 249 проб почв и 179 проб индикаторных видов растений.

Анализ отобранных проб осуществлен в аккредитованных лабораториях ВСЕГЕИ им. А. П. Карпинского и центре «Эколаб». В донных осадках, почве и растениях тяжелые металлы (ТМ) — Cu, Zn, Ni, Co, Fe, Mn, Cr, Pb, Hg, Cd, Ba, Sr, Sc — определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) на приборе «ELAN-6100 DRC» с полным кислотным разложением проб по ПНД Ф 16.1:2.3:3.11—98; анализ нефтяных углеводородов (НУ) — флуориметрическим методом; хлоридов, сульфатов, фосфатов и нитратов — методом ионной хроматографии. Определение ТМ в воде выполнено на атомно-абсорбционном спектрофотометре «Квант-Z-ЭТА».

Общий физико-химический анализ образцов, определение содержания подвижных форм металлов в донных осадках и почвах (в вытяжке ацетатно-аммонийным буфером pH 4,8), а также биотестирование почв с применением дафнии *Daphnia magna* Straus. (ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.12—06 и ПНД Ф Т 16.1:2:2.3:3.9-12—06) и хлореллы *Chlorella vulgaris* Beijer. (ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10—04 и ПНД Ф Т 16.1:2:2.3:3.7—04) осуществлены в лаборатории геоэкологического мониторинга Института наук о Земле СПбГУ. Тестирование выполнялось по образцам, которые были отобраны

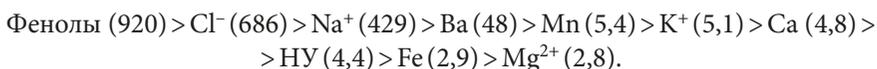
главным образом вблизи шламовых амбаров и разливов пластовых вод. В 156 проведенных экспериментах исследована токсичность 26 проб почв с использованием методики определения смертности *D. magna* при воздействии токсических веществ в водной вытяжке. Время экспозиции — 1, 6, 24, 48, 72 и 96 ч. На 16 пробах поставлены эксперименты с измерением оптической плотности культуры водоросли *S. vulgaris*. Большинство исследованных почв имеют высокую кислотность ($pH = 3,9 \div 5,7$), которая не позволяет проводить биотестирование на *D. magna* (организмы теряют жизнеспособность при $pH < 5,8$), поэтому почвенные вытяжки разбавлялись, чтобы искусственно снизить кислотность до $pH = 5,9 \div 6,4$.

При камеральной обработке материалов использовались методы описательной статистики, парной корреляции Пирсона, факторный анализ методом главных компонент.

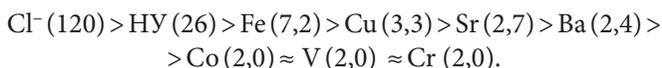
3. Результаты и обсуждение

Основными источниками загрязнения в пределах изученных ЛУ служат строительство скважин, движение автотранспорта, а также складирование буровых отходов в шламовые амбары. На практике часто наблюдается разрушение стенок амбаров и сток отходов в тундру, что приводит к деградации растительности на подвергшихся загрязнению участках за пределами промышленных площадок. В связи с этим важным представляется идентификация поллютантов-индикаторов загрязнения ПТК буровыми отходами.

Индикаторные вещества устанавливались на основе сравнения химического состава отходов и компонентов окружающей среды, а именно: жидкой фазы буровых отходов с поверхностными водами, а также бурового шлама с донными осадками водных объектов района исследования. С использованием кларка концентрации (его значение приведено в скобках) химических веществ был получен следующий ряд снижения содержания поллютантов в воде шламовых амбаров:



Снижение кларка концентрации (Кк) поллютантов в твердой фазе отходов представлено иной последовательностью поллютантов:



Полученные результаты свидетельствуют о значительном уровне загрязненности шламовых вод по широкому спектру веществ. При сбросе пластовых вод наиболее выражена индикаторная значимость фенола, хлоридов, Na^+ и Ba^{2+} . В буровом шламе отмечены высокие содержания хлоридов, НУ, Cu, Sr и Ba.

Оценка состояния природных вод, донных осадков и почв района исследований. Мониторинг *поверхностных вод* ЛУ показал, что они относятся преимущественно к гидрокарбонатно-кальциевому типу. Трансформация анионно-катионного состава природных вод, вызванная геологоразведочными и добычными работами на территории исследований, не установлена. Физико-химические свойства воды характеризуются относительно широким диапазоном значений pH

(3,62–6,75) и окислительно-восстановительного потенциала (98,0–385,0 мВ). По минерализации природные воды района исследований относятся к ультрапресным. По жесткости они повсеместно соответствуют очень мягким. Отмечается относительно низкий фон содержания микроэлементов, за исключением Cu, Mn и Fe, что обусловлено высокой подвижностью этих металлов в тундровых ландшафтах. Надежный показатель отсутствия загрязнения природных вод отходами бурения — удельная электрическая проводимость, соответствующая уровню минерализации воды. Удельная электрическая проводимость природных вод менялась в относительно узком диапазоне 5,7–106 мкСм/см, что соответствует природным значениям показателя, в то время как под влиянием сброса пластовых вод значение электропроводности поверхностных вод, согласно нашим данным, может достигать 2980 мкСм/см и более.

Результаты мониторинга *донных осадков* подтверждают вывод об отсутствии выраженного техногенного загрязнения водных объектов. На основе анализа геохимических спектров четвертичных глин и современных осадков установлена высокая степень зависимости состава последних от подстилающих четвертичных пород. Внутри ЛУ высокая дисперсия содержания химических элементов обусловлена гранулометрическим составом осадков (Опекунов и др., 2012).

Почвенный покров характеризуется низким содержанием загрязняющих веществ. Однако для органогенного горизонта по результатам факторного анализа в структуре химического состава почв выделен фактор, связанный с загрязнением ПТК шламовыми отходами при буровых работах. Антропогенное воздействие приводит к увеличению в органогенном горизонте показателя рН и концентрации сульфатов, хлоридов, фосфатов, НУ, а также халькофилов — Cd, Zn, Pb, Cu. Загрязнение почв индицируется в гумусовом горизонте парагенезисом Ba—Sr.

Химический состав растений. Как показали проведенные исследования, во всех изученных видах растений при росте техногенных нагрузок отмечены значимые изменения химического состава и зольности. Общее содержание минеральной части (зольность) растений на контрольных СМ значительно выше, чем на фоновых. Наиболее существенные различия установлены в пробах мха *Pleurozium schreberi* и лишайника *Cladonia stellaris* (рис. 2). Так, например, в лишайниках *C. stellaris* на загрязненных участках зольность увеличивается в 9 раз по сравнению с контрольными значениями, в мхах *P. schreberi* — в 6,5 раза, а в кустарничках *Vaccinium uliginosum*, *V. vitis-idaea*, *Empetrum nigrum* — в 2 раза. Средняя зольность багульника на загрязненной территории незначительно отличается от фоновой, однако она выше 2,38 % (это значение приведено в работе (Опекунова, 2013) для Уренгойской тундры. По своей зольности растения располагаются в убывающий ряд:

Мох P. schreberi > Карликовая березка *B. nana* (листья) > Лишайники цетрария *C. islandica* и кладония *C. stellaris* > Брусника *V. vitis-idaea* > Голубика *V. Uliginosum* > > Водяника *E. nigrum* > Багульник *L. decumbens* > Карликовая березка *B. nana* (ветви).

Изученные виды растений в условиях фоновых участков характеризуются различными биологическими особенностями накопления химических элементов: *L. decumbens* отличается повышенным содержанием Mn и Ba, *V. uliginosum*, *V. vitis-idaea* — Mn, Zn и Ba, лишайник *C. stellaris* концентрирует Pb. Кустарнички в целом характеризуются относительно небольшой дисперсией содержания ТМ

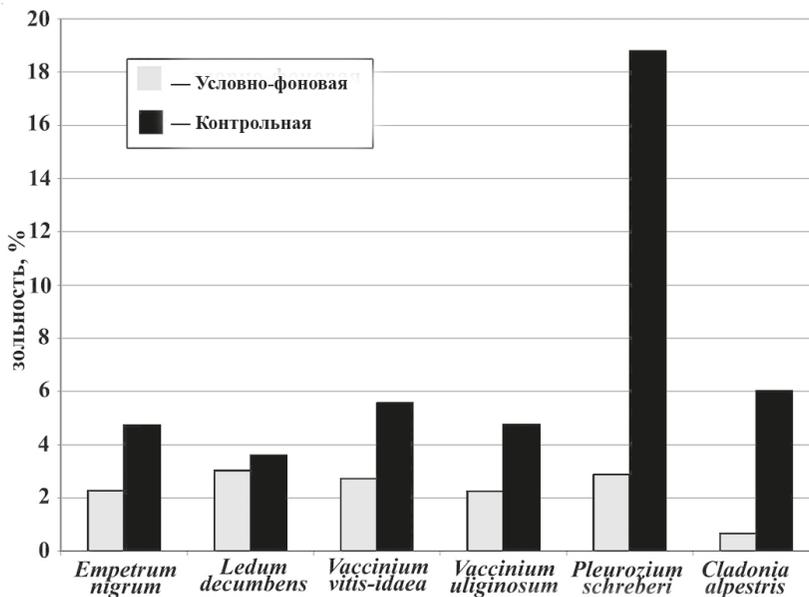


Рис. 2. Зольность растений на контрольной и фоновой СМ Берегового месторождения

в отличие от лишайников, для которых типичен значительный разброс концентраций металлов (табл. 1). Максимальное содержание микроэлементов установлено в мхах *P. schreberi*, за исключением Ва, Мн, Zn, содержание которых выше в кустарничках.

Выявлено, что для участков с высокой техногенной нагрузкой характерен рост концентрации в растениях Мн, Ва, V и Sr. Индикаторами общего загрязнения выступают повышенные содержания Ni, Pb, Cd и Co. Высокий уровень содержания Мн, Zn, Cu и Cd отмечен в листьях *V. nana*. Лишайники *C. stellaris* и *C. delisei* характеризуются более высокими концентрациями всех элементов. Кустарнички *V. uliginosum*, *V. vitis-idaea* и *L. decumbens*, а также *E. nigrum* (данный вид обладает высоким содержанием практически всех элементов на контрольной СМ) отличаются повышенной концентрацией Мн. Заметим, что содержание Мн в кустарничках *V. uliginosum*, *V. vitis-idaea* и *L. decumbens*, а также *E. nigrum* на контрольной СМ ниже, чем на фоновой. Это вызвано антагонистическим взаимодействием в тканях растений Мн с Fe, Cr, V, Cd и Pb при антропогенном загрязнении (Алексеева-Попова и Дроздова, 1996; Kabata-Pendias, 2011).

В естественных условиях севера Западной Сибири индикаторные виды растений характеризуются в целом низкими коэффициентами биологического накопления (Кб) ТМ. При наиболее активной аккумуляции Мн, Zn и Cu кустарнички также активно накапливают Ва. По интенсивности поглощения микроэлементов растения располагаются в следующем порядке:

V. nana, листья > *P. schreberi* > *C. delisei* > *C. stellaris* > *E. nigrum* >
> *L. decumbens* > *V. vitis-idaea* > *V. uliginosum*.

Таблица 1. Статистические параметры содержания микроэлементов в индикаторных видах растений изученных ЛУ, мг/кг сухого вещества

Вид	Параметр	Ba	Mn	Zn	Cu	Ni	Co	Pb	Cd	Cr	Fe	V	Sc	Sr
Береговой ЛУ														
Багульник <i>Ledum decumbens</i> , (n = 41)	Среднее	93	866	20	3,2	1,0	0,09	0,29	0,010	0,5	147	0,4	0,05	10
	Минимум	46	441	15	1,9	0,6	0,03	0,10	0,006	0,1	48	0,1	0,01	3
	Максимум	128	1546	32	4,4	2,3	0,55	0,99	0,030	4,7	927	3,1	0,35	51
	Стандартное отклонение	22	331	4	0,6	0,4	0,08	0,15	0,004	0,7	139	0,5	0,05	8
	Коэффициент вариации	23	38	21	20	38	94	52	40	163	94	114	112	78
Лишайник <i>Cladonia stellaris</i> , (n = 27)	Среднее	27	40	12	1,2	0,6	0,18	1,10	0,060	1,2	357	1,2	0,15	5
	Минимум	3	11	4	0,4	0,2	0,03	0,32	0,020	0,2	69	0,2	0,03	1
	Максимум	202	89	18	2,4	2,1	0,75	2,33	0,154	5,7	1666	6,5	0,63	24
	Стандартное отклонение	41	22	4	0,5	0,4	0,16	0,50	0,028	1,2	355	1,3	0,14	5
	Коэффициент вариации	151	57	31	41	64	91	45	46	94	99	108	97	100
Пырейный ЛУ														
Багульник <i>Ledum decumbens</i> , (n = 34)	Среднее	90	950	19	4	0,9	0,06	0,2	0,009	0,29	96	0,26	0,03	12
	Минимум	54	405	14	3	0,4	0,02	0,1	0,005	0,08	34	0,07	0,01	4
	Максимум	192	1649	26	6	1,9	0,15	0,6	0,015	0,82	212	0,77	0,10	34
	Стандартное отклонение	26	257	3	1	0,4	0,03	0,1	0,002	0,19	55	0,19	0,03	7
	Коэффициент вариации	29	27	17	20	44	55	42,3	25	64	57	74	79	59
Лишайник <i>Cladonia stellaris</i> , (n = 30)	Среднее	16	54	17	1,6	0,7	0,19	1,2	0,071	1,09	361	1,2	0,17	6
	Минимум	2	7	4	0,4	0,1	0,02	0,3	0,020	0,11	32	0,1	0,01	1
	Максимум	71	586	74	6,8	2,6	0,70	3,7	0,198	3,84	1317	4,8	0,74	15
	Стандартное отклонение	15	102	13	1,1	0,5	0,18	0,7	0,042	0,93	333	1,2	0,18	4
	Коэффициент вариации	91	188	76	72	68	91	60	60	86	92	103	105	67
Хадыряхинский ЛУ														
Багульник <i>Ledum decumbens</i> , (n = 5)	Среднее	86	1506	37	7	1,29	0,08	0,21	0,016	0,07	51	0,12	0,011	6
	Минимум	67	566	29	5	0,44	0,03	0,08	0,011	0,05	36	0,07	0,005	5
	Максимум	103	2464	45	8	2,52	0,23	0,31	0,020	0,09	64	0,16	0,018	8
Лишайник <i>Cladonia stellaris</i> , (n = 4)	Среднее	11	42	13	1,1	0,51	0,09	1,1	0,072	0,48	150	0,44	0,06	2
	Минимум	3	26	10	1,0	0,40	0,05	0,8	0,052	0,37	92	0,30	0,04	1
	Максимум	26	70	20	1,4	0,62	0,13	1,4	0,088	0,70	226	0,73	0,09	2
Кларк растений суши (Добровольский, 2003)		22,5	205	30	8	2	0,5	1,25	0,035	1,8	—	1,5	0,25	35

Изменение Кб может быть вызвано нарастанием антропогенной нагрузки при освоении месторождений (Опекунова, 2013; Кукушкин, 2017; Opekunova et al, 2018). На нарушенных участках снижается интенсивность поглощения Mn, Cu и Zn вечнозелеными кустарничками и увеличивается Кб остальных микроэлементов (рис. 3). Для листопадного кустарничка *V. uliginosum* изменение коэффициента не отмечается.

Максимальным Кб для большинства металлов в фоновых условиях характеризуется мох *P. schreberi*, а в кустарничках отмечается накопление Ba, Mn, Zn, Cu и Cd. На контрольной СМ в районе куста скважин ситуация заметно меняется. Максимальные Кб для Mn, Zn, Cd и Sr зафиксированы в листьях *B. nana*. Для остальных элементов Кб максимальны в *P. schreberi* и *E. nigrum*, что позволяет рассматривать эти растения в качестве видов — биоиндикаторов техногенного загрязнения. Однако их использование на изученной территории ограничено в связи с низким обилием и стенотопностью, что противоречит основным требованиям, предъявляемым к видам-биоиндикаторам (Опекунова, 2016). Возможности использовать для биоиндикации листья широко распространенной в районе исследований *B. nana* снижены тем, что химический состав однолетних тканей сильно изменяется под влиянием погодных условий конкретного года.

На исследованной территории наиболее распространены виды *Ledum decumbens* и *Cladonia stellaris*, что при хороших индикационных свойствах позволяет использовать их в качестве основных индикаторов антропогенного воздействия. Для всех изученных СМ, расположенных в северной тайге, на типичных и полигональных тундрах отмечены следующие закономерности накопления ТМ: багульник в условиях антропогенной нагрузки активно концентрирует лито- и сидерофильные элементы. Показателем загрязнения, как правило, становится высокая концентрация в нем Ba, Sr и Ni, также он активно поглощает Co, Fe, Cr и V. В лишайнике *C. stellaris* увеличение техногенной нагрузки индицируется высокими концентрациями практически всех изученных ТМ (рис. 4).

Но отметим определенные различия в изменении Кб, обусловленные разными видами антропогенного воздействия. При поступлении в ПТК бурового шлама и шламовых вод отмечается более резкое снижение аккумуляции багульником Mn и Zn, однако интенсивность поступления Cu не меняется, что может быть вызвано присутствием в буровых растворах медьсодержащих присадок. В случае аэротехногенного загрязнения в багульнике не происходит накопления Sr, концентрация которого резко увеличивается при загрязнении ПТК буровым шламом, что, возможно, обусловлено наличием в буровых растворах хром лигносульфоната в качестве пластифицирующей добавки.

Метод главных компонент факторного анализа (табл. 2) подтвердил, что на содержание ТМ в растениях, которые характеризуются высокой вариабельностью, сильно влияет техногенез. В лишайнике химический состав в первую очередь обусловлен естественными процессами. Однако анализ факторной структуры показал, что можно выделить компоненту (определяющую 6% дисперсии выборки), связанную с антропогенным загрязнением. Рядом с производственными объектами промыслов на формирование микроэлементного состава растений влияют поступление шламовых вод в почвенный покров (Ba), а также аэротехногенный перенос поллютантов от факельных установок, с отсыпных производственных площадок и автодорог (Pb—Cd).

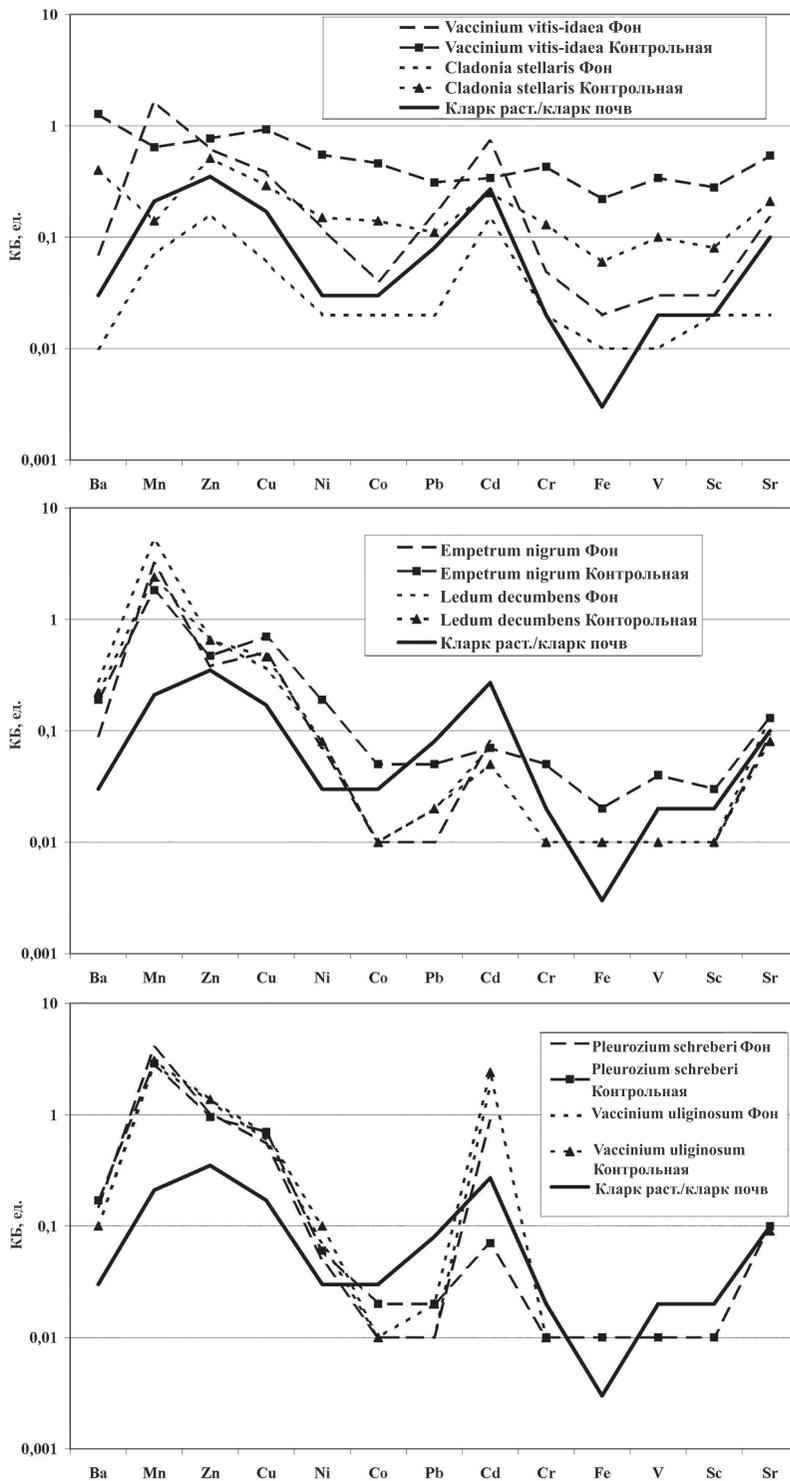
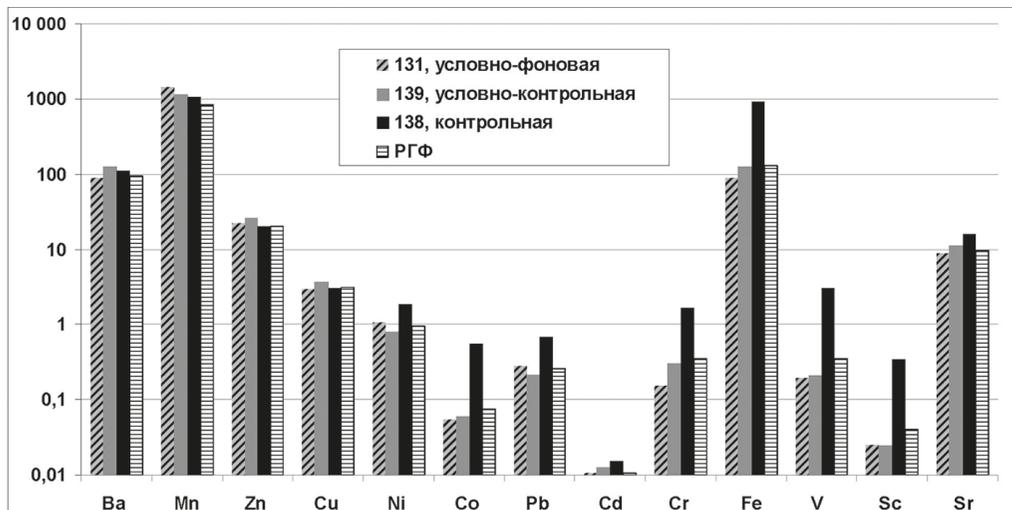
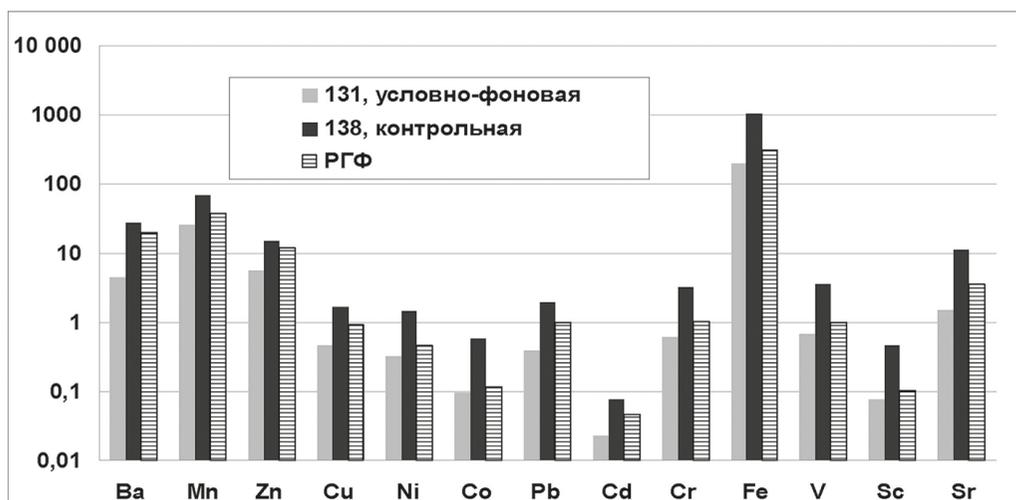


Рис. 3. Изменения Кб в растениях фоновых и контрольных участков



а



б

Рис. 4. Содержание ТМ в *Ledum decumbens* (а) и *Cladonia stellaris* (б) на участках с различной степенью антропогенной нагрузки на территории Берегового ЛУ, мг/кг сухого вещества

В багульнике *Ledum decumbens* по результатам факторного анализа выделено четыре ведущих фактора, определяющих его химический состав. Первые два, как и в лишайнике, — это породный и фактор торфонакопления. Вес породного фактора значительно ниже, что указывает на биогеохимические особенности кустарничка. Вес второго фактора практически не изменяется (табл. 2). Третья и четвертая компоненты в факторной структуре выборки указывают на техногенное поступление Ba и Sr в растения. Показателем воздействия разливов отработанных буровых растворов служит парагенезис химических элементов, объединяющий Ba, Sr и Ni в противовес аккумуляции Mn (третий фактор). Еще одним проявлением техно-

генного воздействия при эксплуатации месторождений через ассоциацию Pb—Cd служит прямое осаждение минеральных частиц на растениях при пылении от автомобильных дорог и размыве песчаных отсыпок (четвертый фактор). В пробах растений, отобранных на участках прорыва отходов из шламовых амбаров, чаще наблюдаются высокие нагрузки обоих факторов.

Таблица 2. Парагенезисы химических элементов в обобщенных факторных нагрузках, отвечающие за распределение ТМ в растениях антропогенно загрязненных ПТК

Парагенезис	Доля фактора, %	Фактор
<i>Лишайник Cladonia stellaris</i>		
—	69	Породный
Ni ₉₈ Co ₉₆ Fe ₉₃ Cr ₉₃ Mn ₃₅ V ₉₂ Sc ₉₂ Sr ₈₆ Pb ₈₄ Cu ₇₈ Zn ₆₇ Ba ₆₆ Cd ₆₆ Mn ₅₈		
$\frac{\text{Mn}_{71} \text{Zn}_{63} \text{Cu}_{56} \text{Cd}_{39}}{\text{V}_{36} \text{Fe}_{33} \text{Cr}_{32} \text{Ba}_{30}}$	16	Торфонакопление
$\frac{\text{Ba}_{46}}{\text{Cd}_{54} \text{Pb}_{35}}$	6	Антропогенный
<i>Багульник Ledum decumbens</i>		
Fe ₉₆ V ₉₅ Sc ₉₄ Co ₉₃ Pb ₇₀ Cr ₅₅ Ni ₃₇	37	Породный
Zn ₈₀ Cd ₇₅ Mn ₆₀ Ba ₅₁	20	Торфонакопление
$\frac{\text{Mn}_{48}}{\text{Sr}_{59} \text{Ni}_{55} \text{Ba}_{51}}$	11	Антропогенный
$\frac{\text{Sr}_{53}}{\text{Pb}_{56} \text{Cd}_{51}}$	9	Антропогенный

*Числитель — положительные значения факторных нагрузок; знаменатель — отрицательные значения

Сопоставление микроэлементного состава растений фоновых и контрольных СМ и результатов факторного анализа позволяет выделить основные виды антропогенного загрязнения растительного покрова. На лишайники преобладающее воздействие оказывает аэротехногенный перенос. Типоморфными элементами загрязнения материалом отсыпок выступает ассоциация Pb—Cd, загрязнения буровыми растворами — Ва. Химический состав багульника более чувствителен к техногенезу: в его структуре отражаются оба источника загрязнения в качестве самостоятельных факторов.

Результаты биотестирования. Биотестирование почв на двух тест-объектах (*Daphnia magna* и *Chlorella vulgaris*) выполнялось по фоновым и контрольным образцам. Установлено, что из 16 изученных проб 3 экологически безвредны. Последними характеризуются фоновые СМ. В 6 пробах зафиксированы 50%-ная гибель дафний и снижение более чем на 50% средней оптической плотности культуры *C. vulgaris* по сравнению с контрольным вариантом. Это свидетельствует об остром

Таблица 3. Статистические зависимости токсичности проб почв от содержания химических веществ

Вещество	Средняя концентрация, мг/кг		Коэффициент корреляции концентрации валовых/подвижных форм с токсичностью	
	валовая	подвижных форм	По <i>Daphia magna</i>	По <i>Chlorella vulgaris</i>
Sc	3,9 ± 1,7	—	-0,42/—	-0,50/—
V	33,3 ± 15,5	—	-0,38/—	-0,47/—
Cr	22,7 ± 10,5	1,1 ± 0,7	-0,38/-0,27	-0,46/-0,32
Mn	278 ± 176	56 ± 25	-0,33/-0,36	-0,38/-0,32
Fe	14 300 ± 6200	936 ± 968	-0,03/-0,13	-0,18/-0,04
Co	5,13 ± 2,51	0,8 ± 0,4	-0,48/-0,59	-0,55/-0,57
Ni	11,7 ± 3,7	0,8 ± 0,6	-0,31/-0,27	-0,47/-0,21
Cu	9,8 ± 1,9	1,2 ± 0,3	0,26/ 0,37	0,03/0,34
Zn	33,4 ± 7,5	4,7 ± 1,5	-0,23/0,12	-0,41/0,21
Sr	84,0 ± 27,0	—	-0,29/—	-0,45/—
Cd	0,33 ± 0,11	0,11 ± 0,04	0,37/0,37	0,47/0,35
Ba	302 ± 102	—	-0,36/—	-0,48/—
Pb	14,6 ± 2,4	1,8 ± 0,6	0,00/0,05	0,04/-0,09
Hg	0,016 ± 0,003	—	0,43/—	0,48/—
Нитраты	1,16 ± 0,56*	—	0,68/—	0,46/—
Сульфаты	3,6 ± 0,6*	—	-0,20/—	-0,06/—
Фосфаты	5,8 ± 0,7*	—	0,60/—	0,53/—
Хлориды	5,8 ± 1,7*	—	0,74/—	0,54/—
Нефтепродукты	20,0 ± 12,0	—	0,08/—	0,20/—
Фенолы	< 0,05	—	—	—

* концентрация определена в водной вытяжке почв

Примечания: прочерк — нет данных, жирным шрифтом выделены значимые положительные показатели ($p=0,05$).

токсическом действии тестируемых проб на тест-объекты. В 7 образцах зарегистрировано снижение средней оптической плотности *C. vulgaris* на 20–50 % по сравнению с контрольным вариантом и гибель 20–40 % *D. magna*, что позволяет сделать вывод о среднем уровне токсического действия в пробах.

В 10 пробах с месторождения Русское биотестирование проводилось только по *D. magna*. Оказались нетоксичными 3 пробы с фоновых участков (0–10 % ги-

бели рачка). Среди проб почв, отобранных вблизи объектов нефтегазодобычи, обнаружена одна нетоксичная, остальные пробы относятся к остро- и среднетоксичным — вызывают соответственно 50–80 и 20–30% гибели рачка. Загрязненные почвы находятся в основном в подчиненных фациях — в низинах и на нижней части склонов, что указывает на латеральную миграцию ТМ в пределах почвенной катены.

Результаты биотестирования с применением тест-объектов *C. vulgaris* и *D. magna* показали высокую степень сходимости: коэффициент парной корреляции между процентом гибели *D. magna* и оптической плотностью *C. vulgaris* составил 0,96 (критическое значение при $p = 0,05 \dots 0,36$).

Из изученного перечня загрязняющих веществ достоверная положительная корреляция токсического воздействия на тест-объекты установлена только для валового содержания Cd ($r = 0,37$ и $0,47$ для дафнии и хлореллы соответственно; критическое значение при $p = 0,05 \dots 0,36$) и Hg ($r = 0,43$ и $0,48$) (табл. 3). Однако наибольшая корреляция отмечается с содержанием в водной вытяжке нитратов ($r = 0,68$ и $0,46$), хлоридов ($r = 0,74$ и $0,54$) и фосфатов ($r = 0,60$ и $0,53$). Из данного перечня, как было показано выше, хлориды проявляют себя как индикаторы загрязнения почв буровыми шламами. С учетом этих результатов можно сделать вывод, что на тундровые ландшафты, в которых относительно низки скорости латеральной миграции вещества, наиболее губительно воздействует засоление почв, имеющее место при сбросе пластовых вод и выносе легкорастворимых хлоридов из шламовых амбаров.

Чтобы идентифицировать вещества, оказывающие токсическое воздействие, выполнен анализ подвижных форм металлов (табл. 3). Полученные данные позволяют сделать вывод, что их содержание в почвах характеризуется низкими значениями, не превышающими ПДК. Это еще раз доказывает невысокий уровень загрязнения ТМ почв даже в непосредственной близости к шламовым амбарам. Корреляционный анализ содержания подвижных форм с токсичностью проб показал, что слабая связь реакции *D. magna* наблюдается с концентрацией подвижных форм Cd и Cu ($r = 0,37$ при критическом значении $0,36$).

В целом низкий уровень корреляции результатов биотестирования с валовым содержанием и содержанием подвижных форм ТМ в почвах показывает, что токсичность изученных образцов обусловлена главным образом засолением хлоридами, сульфатами и фосфатами при загрязнении окружающей среды пластовыми водами.

4. Выводы

1. Одним из основных источников техногенного воздействия на ПТК исследованных ЛУ служат шламовые амбары. Результаты изучения химического состава отходов бурения свидетельствуют о значительном уровне загрязненности их по широкому спектру веществ. При поступлении пластовых вод в окружающую среду наиболее выражена индикаторная значимость фенола, хлоридов, Na^+ и Ba^{2+} . В буровом шламе отмечен высокий уровень концентрации хлоридов, HУ, Cu, Sг и Ва.

2. Анализ химического состава природных вод, донных отложений, почв и растений показал, что общий уровень загрязнения исследованных газоконденсатных месторождений низкий. Наиболее чутко на воздействие со стороны объектов добычи углеводородов реагирует растительность. Максимальные различия значений Кб на фоновых и контрольных СМ отмечены для *P. schreberi* и *E. nigrum*. Однако использование последних в качестве индикаторов на изученной территории ограничено в связи с их низким обилием и стенопопностью. По комплексу признаков в качестве основных индикаторов техногенеза на исследованной территории целесообразно принять багульник *Ledum decumbens* и лишайник *Cladonia stellaris*.
3. Багульник *Ledum decumbens* и лишайник *Cladonia stellaris* индицируют разные виды и механизмы загрязнения. На лишайники основное влияние оказывает аэротехногенное поступление веществ вследствие работы факельных установок и перенос тонкодисперсного материала с отсыпных производственных площадок и автодорог (Pb—Cd). В багульнике антропогенное воздействие при добычных работах проявляется шире: прямое осаждение минеральных частиц на тканях растений (Pb—Cd) и поступление микроэлементов из загрязненных поверхностных горизонтов почв (Ba—Sr—Ni). В целом в условиях антропогенной нагрузки в багульнике снижается интенсивность аккумуляции Mn и Zn и увеличивается накопление Co, Fe, Cr и V; лишайник начинает интенсивно поглощать Ba, Sr, V, Pb, Ni и Co, кроме того, в лишайнике резко возрастает зольность.
4. Биотестирование образцов почв с использованием дафний *D. magna* и тест-культуры хлореллы *C. vulgaris* показало, что фоновые пробы экологически безвредны. Среди проб, взятых на контрольных площадках, выделено две группы. В одной (в основном вблизи шламовых амбаров) зафиксировано 50 % и более гибели дафний и такая же доля снижения средней величины оптической плотности культуры *C. vulgaris* по сравнению с контрольным вариантом, что означает острое токсическое действие водной вытяжки из почв на тест-объекты. В другой группе было зарегистрировано среднее токсическое действие почв, выраженное в снижении средней величины оптической плотности *C. vulgaris* по отношению с контрольным вариантом от 20 до 50 % и гибель 20–40 % *Daphnia magna*. Достоверная положительная корреляция токсического действия на тест-объекты наблюдается только для Hg и Cd, а также для концентрации в водной вытяжке нитратов, хлоридов и фосфатов. Статистически значимое влияние подвижных форм металлов на тест-объекты установлено для Cd и Cu.
5. При проведении локального мониторинга на территории добычи газа и газоконденсата фиксация малозаметных изменений окружающей среды на основе изучения элементного состава абиотических компонентов ПТК (почвы и донных осадков) недостаточно эффективна. В этом случае в комплекс мониторинговых исследований целесообразно включать биологические методы контроля загрязнения среды. Индикаторные виды растений реагируют на малозаметные изменения через возрастание минерализации и рост интенсивности поглощения металлов, что отражается в увеличении коэффициента биологического накопления. Перечень металлов-индикаторов

загрязнения зависит от типа воздействия и вида растений. Биотестирование целесообразно использовать для оценки токсичности среды, особенно вблизи объектов техногенеза.

Литература

- Алексеева-Попова, Н. В., Дроздова, И. В., 1996. Особенности минерального состава растений и почв на ультраосновных породах Усть-Бельского горного массива (среднее течение реки Анадырь). II. Растения. Бот. журн. 81(5), 70–78.
- Бардина, Т. В., Чугунова, М. В., 2012. Биотестирование загрязненных тяжелыми металлами урбанизированных почв. Проблемы биогеохимии и геохимической экологии 21(4), 16–20.
- Капелькина, Л. П., Чугунова, М. В., Бардина, Т. В., Малышкина, Л. А., Герасимов, А. О., 2013. Оценка токсичности буровых шламов. Токсикологический вестник 6, 46–52.
- Кукушкин, С. Ю., 2017. Индикаторы антропогенной нагрузки на природно-территориальные комплексы при освоении нефтегазоконденсатных месторождений Севера Западной Сибири. URL: <https://clck.ru/E5J3w> (дата обращения: 09.08.2018).
- Опекунов, А. Ю., Опекунова, М. Г., Кукушкин, С. Ю., Ганул, А. Г., 2012. Оценка экологического состояния природной среды районов добычи нефти и газа в Ямало-Ненецком автономном округе. Вестник СПбГУ Сер. 7: Геология, география 4, 87–101.
- Опекунова, М. Г., 2013. Диагностика техногенной трансформации ландшафтов на основе биоиндикации. URL: <http://www.dissertat.com/content/diagnostika-tekhnogennoi-transformatsii-landshaftov-na-osnove-bioindikatsii-0> (дата обращения: 09.08.2018).
- Опекунова, М. Г., 2016. Биоиндикация загрязнений. Изд-во С.-Петербург. ун-та, Санкт-Петербург.
- Полевая геоботаника, 1976 / Лавренко, Е. М., Корчагина А. А., (под ред.), 5, Издательство Академии Наук СССР, Ленинград.
- Рыбина, Г. Е., 2004. Токсичность буровых шламов разного состава нефтепромыслов Западной Сибири для пресноводных гидробионтов. URL: <http://www.dslib.net/gidro-biologia/toksichnost-burovyh-shlamov-raznogo-sostava-neftepromyslov-zapadnoj-sibiri-dlja.html> (дата обращения: 09.08.2018).
- Светличная, Т. В., 2004. Оценка экологической опасности тонкодисперсных фракций бурового шлама и разработка методов обращения с отходами бурения при освоении месторождений нефти и газа дагестанского участка Каспийского моря. URL: <http://www.dissertat.com/content/otsenka-ekologicheskoi-opasnosti-tonkodispersnykh-fraktsii-burovogo-shlama-i-razrabotka-meto> (дата обращения: 09.08.2018).
- Adamo, P., Bargagli, R., Giordano, S., Modenesi, P., Monaci, F., Pittao, E., Spagnuolo, V., Tretiach, M., 2008. Natural and pre-treatments induced variability in the chemical composition and morphology of lichens and mosses selected for active monitoring of airborne elements. Environmental Pollution 152, 1, 11–19.
- Ahtiainen, J., Valo, R., Järvinen, M., Joutti A., 2002. Microbial toxicity tests and chemical analysis as monitoring parameters at composting of creosote-contaminated soil. Ecotoxicology and Environmental Safety 53, 323–329.
- Bargagli, R., Monaci, F., Borghini, F., 2002. Mosses and lichens as biomonitors of trace metals. A comparison study on *Hypnum cupressiforme* and *Parmelia caperata* in a former mining district in Italy. Environmental Pollution 116, 2, 279–287.
- Kabata-Pendias, A., 2011 Trace elements in soils and plants. Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York.
- Lors, C., Ponge, J.-F., Aldaya, M. M., Damidot, D., 2011. Comparison of solid and liquid-phase bioassays using ecoscores to assess contaminated soils. Environmental Pollution 159, 2974–2981.
- Macedo-Miranda, G., Avila-Pérez, P., Gil-Vargas, P., Zarazúa, G., Sánchez-Meza, J. C., Zepeda-Gómez, C., Tejeda, S., 2016. Accumulation of heavy metals in mosses: a biomonitoring study SpringerPlus 5(1), 715.
- Markert, B., Wünschmann, S., Baltreñaite, E., 2012. Innovative observation of the environment bioindicators and biomonitors: definitions, strategies and applications. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management 20 (3), 221–239.
- Maxam, G., Rila, J.-P., Dott, W., Eisentraeger, A., 2000. Use bioassays for assessment of water-extractable ecotoxic potential of soil. Ecotoxicol. Environ. Saf. 45, 240–246.

- Opekunova, M. G., Opekunov, A. Y., Kukushkin, S. Y., Arestova, I. Yu., 2018. Evaluation of Environmental Transformation in Areas of Hydrocarbon Deposits in the North of Western Siberia. *Contemporary Problems of Ecology* 11(1), 99–110.
- Ribe, V., Auleniusa, E., Nehrenheima, M., Martellb, U., Odlarea, M., 2012. Applying the triad method in a risk assessment and metal industry site. *Journal of Hazardous Materials* 207–208, 15–20.
- Terekhova, V. A., 2011. Soil bioassay: problems and approaches. *Eurasian Soil Science* 44(2), 173–179.

Статья поступила в редакцию 27 марта 2018 г.

Статья рекомендована в печать 4 июля 2018 г.

Контактная информация:

Опекунова Марина Германовна — m.opekunova@mail.ru
Опекунов Анатолий Юрьевич — a_opekunov@mail.ru
Арестова Ирина Юрьевна — i.arestova@spbu.ru
Кукушкин Степан Юрьевич — s.kukushkin@spbu.ru
Спаский Владимир Владимирович — vvs61991@yandex.ru
Никитина Мария Александровна — nikitina.mashka@mail.ru
Елсукова Екатерина Юрьевна — e.elsukova@spbu.ru
Шейнерман Надежда Абрамовна — nsheiner@mail.ru
Недбаев Иван Сергеевич — nedbaev.ivan@yandex.ru

Use of bioindication and biotesting methods in assessing the ecological state of the territory of gas condensate deposits in the north of Western Siberia

M. G. Opekunova, A. Yu. Opekunov, I. Yu. Arestova,
S. Yu. Kukushkin, V. V. Spasskij, M. A. Nikitina,
E. Yu. Elsukova, N. A. Sheynerman, I. S. Nedbaev

St. Petersburg State University,
7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199178, Russian Federation

For citation: Opekunova M. G., Opekunov A. Yu., Arestova I. Yu., Kukushkin S. Yu., Spasskij V. V., Nikitina M. A., Elsukova E. Yu., Sheynerman N. A., Nedbaev I. S. Use of bioindication and biotesting methods in assessing the ecological state of the territory of gas condensate deposits in the north of Western Siberia. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2018, vol. 63, issue 3, pp. 326–344. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.305> (In Russian)

During environmental monitoring in the territory of licensed areas of the north of Western Siberia (YNAO), substances-indicators of pollution of the environment by drilling waste were identified. It has been established that the discharge significance of phenol, chlorides, Na⁺ and Ba²⁺ is most pronounced when discharging stratal waters. In the drill cuttings, the high level of chloride, petroleum hydrocarbon, Cu, Sr and Ba concentration was noted. To assess the ecological state of the natural environment in the gas condensate fields, a set of bioindication methods including determination of the chemical composition of soils and plants and biotesting of water extracts of soils using the *Chlorella vulgaris* and *Daphnia magna* test objects was applied. The content of heavy metals Zn, Cd, Cu, Sr, Fe, Mn, Cr, Pb, Ba, Co, and Ni is determined in 8 plant species. Indicators of early trends in the transformation of ecosystems under the influence of anthropogenic load have been identified. There are *Ledum decumbens* and *Cladonia stellaris*. The convergence of the results of methods of biotesting, the content of pollutants in soils and plants are established. The role of biological indication methods under unobtrusive changes in the state of the environment under conditions of gas condensate deposits is shown.

Keywords: bioindication, biotesting, pollution, heavy metals, gas condensate field, north of Western Siberia.

References

- Adamo, P., Bargagli, R., Giordano, S., Modenesi, P., Monaci, F., Pittao, E., Spagnuolo, V., Tretiach, M., 2008. Natural and pre-treatments induced variability in the chemical composition and morphology of lichens and mosses selected for active monitoring of airborne elements. *Environmental Pollution* 152, 1, 11–19.
- Ahtainen, J., Valo, R., Järvinen, M., Joutti, A., 2002. Microbial toxicity tests and chemical analysis as monitoring parameters at composting of creosote-contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 53, 323–329.
- Alekseeva-Popova, N. V., Drozdova, I. V., 1996. Osobennosti mineral'nogo sostava rastenii i pochv na ul'traosnovnykh porodakh Ust'-Bel'skogo gornogo massiva (srednee techenie reki Anadyr'). II. [Features of mineral composition of plants and soils on ultrabasic rocks of the Ust-Belsky mountain massif (average flow of the Anadyr River). II. Plants]. *Botanicheskii Zhurnal [Botanical Journal]* 81, 70–78. (In Russian)
- Bardina, T. V., Chugunova, M. V., 2012. Biotestirovanie zagriaznennykh tiazhelymi metallami urbanizirovannykh pochv [Biotesting contaminated by heavy metals in urban soils]. *Biotestirovanie zagriaznennykh tiazhelymi metallami urbanizirovannykh pochv [Problems of biogeochemistry and geochemical ecology]* 21(4), 16–20. (In Russian)
- Bargagli, R., Monaci, F., Borghini, F., 2002. Mosses and lichens as biomonitors of trace metals. A comparison study on *Hypnum cupressiforme* and *Parmelia caperata* in a former mining district in Italy. *Environmental Pollution* 116, 2, 279–287.
- Polevaia geobotanika [Field geobotany], 1976. Lavrenko, E. M., Korchagin, A. A. (Eds.) 5, Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, Leningrad. (In Russian)
- Kabata-Pendias, A., 2011 Trace elements in soils and plants. Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York.
- Kapelkina, L. P., Chugunova, M. V., Bardina, T. V., Malishkina, L. A., Gerasimov A. O., 2013. Otsenka toksichnosti burovykh shlamov [Assessment of toxicity of drilling muds]. *Toksikologicheskii vestnik [Toxicological Review]* 6, 46–52. (In Russian)
- Kukushkin, S. Y., 2017. Indikatory antropogennoi nagruzki na prirodno-territorial'nye komplekсы pri osvoenii neftegazokondensatnykh mestorozhdenii Severa Zapadnoi Sibiri [Indicators of anthropogenic load on natural-territorial complexes during the development of oil and gas condensate fields of the North of Western Siberia]. URL: <https://clck.ru/E5J3w> (accessed 09.08.2018). (In Russian)
- Lors, C., Ponge, J.-F., Aldaya, M. M., Damidot, D., 2011. Comparison of solid and liquid-phase bioassays using ecoscores to assess contaminated soils. *Environmental Pollution* 159, 2974–2981.
- Macedo-Miranda, G., Avila-Pérez, P., Gil-Vargas, P., Zarazúa, G., Sánchez-Meza, J. C., Zepeda-Gómez, C., Tejada, S., 2016. Accumulation of heavy metals in mosses: a biomonitoring study *SpringerPlus* 5(1), 715.
- Markert, B., Wünschmann, S., Baltreñaite, E., 2012. Innovative observation of the environment bioindicators and biomonitors: definitions, strategies and applications. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 20(3), 221–239.
- Maxam, G., Rila, J.-P., Dott, W., Eisentraeger, A., 2000. Use bioassays for assessment of water-extractable ecotoxic potential of soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 45, 240–246.
- Opekunov, A. Yu., Opekunova, M. G., Kukushkin, S. Yu., Ganul, A. G., 2012. Otsenka ekologicheskogo sostoianii prirodnoi sredy raionov dobychi nefiti i gaza v Iamal'-Nenetskom avtonomnom okruge [Assessment of the ecological state of the environment of the oil and gas producing regions in the Yamalo-Nenets Autonomous District]. *Vestnik S.-Peterburg. un-ta. Nauki o Zemle [Herald S.-Petersburg. University. Earth Sciences]* 4, 87–101. (In Russian)
- Opekunova, M. G., 2013. Diagnostika tekhnogennoi transformatsii landshaftov na osnove bioindikatsii [Diagnosis of technogenic transformation of landscapes based on bio-indication]. URL: <http://www.dissercat.com/content/diagnostika-tekhnogennoi-transformatsii-landshaftov-na-osnove-bioindikatsii-0> (accessed 09.08.2018). (In Russian)
- Opekunova, M. G., 2016. Bioindikatsiia zagriaznenii [Bioindication of Pollution]. *Izd-vo S.-Peterb. un-ta, Sankt-Peterburg.* (In Russian)
- Opekunova, M. G., Opekunov, A. Y., Kukushkin, S. Y., Arestova, I. Yu., 2018. Evaluation of Environmental Transformation in Areas of Hydrocarbon Deposits in the North of Western Siberia. *Contemporary Problems of Ecology* 11(1), 99–110.
- Ribe, V., Auleniusa, E., Nehrenheima, M., Martellb, U., Odlarea, M., 2012. Applying the triad method in a risk assessment and metal industry site. *Journal of Hazardous Materials* 207–208, 15–20.

- Rybina, G. E., 2004. Toksichnost' burovykh shlamov raznogo sostava neftepromyslov Zapadnoi Sibiri dlia presnovodnykh gidrobiontov [The toxicity of drilling muds of different compositions of oil fields in Western Siberia for freshwater hydrobionts]. URL: <http://www.dslib.net/gidro-biologia/toksichnost-burovyh-shlamov-raznogo-sostava-neftepromyslov-zapadnoj-sibiri-dlja.html> (access date 09.08.2018). (In Russian)
- Svetlichnaya, T. V., 2004. Otsenka ekologicheskoi opasnosti tonkodispersnykh fraktsii burovogo shlama i razrabotka metodov obrashcheniia s otkhodami bureniia pri osvoenii mestorozhdenii nefti i gaza dagestanskogo uchastka Kaspiiskogo moria [Assessment of environmental hazard of finely dispersed fractions of drill mud and development of methods of drilling waste during the development of oil and gas fields in the Dagestan section of the Caspian Sea]. URL: <http://www.dissercat.com/content/otsenka-ekologicheskoi-opasnosti-tonkodispersnykh-fraktsii-burovogo-shlama-i-razrabotka-meto> (access date 09.08.2018).
- Terekhova V. A., 2011. Soil bioassay: problems and approaches. *Eurasian Soil Science* 44(2), 173–179.

Received: March 27, 2018

Accepted: July 4, 2018

Author's information:

Marina G. Opekunova — m.opekunova@mail.ru

Anatoli Yu. Opekunov — a_opekunov@mail.ru

Irina Yu. Arestova — i.arestova@spbu.ru

Stepan Yu. Kukushkin — s.kukushkin@spbu.ru

Vladimir V. Spasskij — vv61991@yandex.ru

Maria A. Nikitina — nikitina.mashka@mail.ru

Ekaterina Yu. Elsukova — e.elsukova@spbu.ru

Nadezhda A. Sheynerman — nsheiner@mail.ru

Ivan S. Nedbaev — nedbaev.ivan@yandex.ru