

ИНЖЕНЕРНАЯ БИОГЕОХИМИЯ: ОТ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИДЕЙ В.И. ВЕРНАДСКОГО ДО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

В.Н. Башкин*

В настоящее время можно вычлени́ть ряд новых направлений развития биогеохимических исследований на стыке фундаментальных и прикладных исследований. Формируется новая область исследований – инженерная биогеохимия, в рамках которой происходит развитие инновационных биогеохимических технологий и технологических процессов, основанных на моделировании и управлении экосистемными биогеохимическими циклами. Рассмотрено применение этих инновационных технологий для восстановления нарушенных и загрязнённых импактных экосистем, в частности, полярных экосистем в зонах работы газодобывающих предприятий. Даны технологические примеры расчётов геоэкологических рисков, а также рисков микробного загрязнения. Показан пул разработанных биогеохимических технологий и их связь с другими инновационными технологиями в рамках газодобывающих компаний.

Ключевые слова: биогеохимический инжиниринг, нарушенные и загрязнённые почвы, рекультивация, микробиом, эмиссия CO₂, биогеохимические технологии.

Ссылка для цитирования: Башкин В.Н. Инженерная биогеохимия: от фундаментальных идей В.И. Вернадского до технологических решений // Жизнь Земли. Т. 45, № 1. С. 39–53. DOI: 10.29003/m3148.0514-7468.2023_45_1/39-53.

Поступила 06.02.2023 / Принята к публикации 08.02.2023

ENGINEERING BIOGEOCHEMISTRY: FROM V.I. VERNADSKY'S FUNDAMENTAL IDEAS TO TECHNOLOGICAL SOLUTIONS

V.N. Bashkin Dr. Sci (Biol.)

*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science
of the Russian Academy of Sciences*

At present, it is possible to identify a number of new directions for the development of biogeochemical research, at the junction of fundamental and applied studies. A novel field of research is being formed, namely, engineering biogeochemistry, within the framework of which innovative biogeochemical technologies and technological processes based on modeling and management of ecosystematic biogeochemical cycles are being developed. The application of these innovative technologies for the restoration of disturbed and polluted impact ecosystems, in particular, polar ecosystems in the zones of operation of gas-producing enterprises, is considered. Technological examples of calculations of geoecological risks, as well as microbial contamination risks are given. A pool of the developed biogeochemical technologies and their connection with other innovative technologies within the framework of gas-producing companies is shown.

Keywords: biogeochemical engineering; disturbed and polluted soils; recultivation; microbiom; CO₂ emission; biogeochemical technologies.

For citation: Bashkin V.N., «Engineering biogeochemistry: from V.I. Vernadsky's fundamental ideas to technological solutions», *Zhizn Zemli* [Life of the Earth] 45, no 1, 39–53 (2023) (in Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.29003/m3148.0514-7468.2023_45_1/39-53.

* Башкин В.Н. – д.б.н., г.н.с. Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Московская область, г. Пушкино, vladimirbashkin@yandex.ru.

Введение. Приоритетные направления развития биогеохимии основаны на представлениях В.И. Вернадского о всеобщности биогеохимических циклов и об их всеохватывающей роли в обмене масс химических элементов между живыми организмами и биосферой [10].

Для количественной параметризации разномасштабных локальных, региональных и глобальных изменений вследствие природных и антропогенных воздействий необходимо количественное понимание и моделирование биогеохимических циклов, что представляется одним из фундаментальных направлений современной науки. При этом изучение фундаментальных механизмов количественной параметризации экосистемных биогеохимических циклов позволяет вычлнить ряд новых направлений развития биогеохимических исследований на стыке именно фундаментальных и прикладных исследований [11]. Формируется новая область исследований – инженерная биогеохимия, в рамках которой происходит развитие инновационных биогеохимических технологий [3]. Биогеохимические технологии – технологии и технологические процессы, основанные на моделировании, понимании и управлении биогеохимическими циклами. Это природоподобные технологии, позволяющие с использованием природных средств восстанавливать природные биогеохимические циклы. Области применения – прежде всего, рекультивация загрязнённых и нарушенных почв. Также они нашли широкое применение при расчётах биогеохимических стандартов, риск-менеджменте, производстве биотоплива и для других природно-ориентированных процессов [19, 20, 22].

Основная цель данной статьи заключается в представлении теоретически и практически обоснованных биогеохимических технологий объектно-ориентированной рекультивации загрязнённых и нарушенных тундровых почв на территориях и участках, появившихся вследствие создания и функционирования газовой промышленности и инфраструктуры в полярных регионах, а также перевыпаса северных оленей на полярных пастбищах.

Восстановление микробного звена биогеохимических циклов. В основе различных биогеохимических технологий заложены принципы управления микробными сообществами в почвах. Основные стратегии микроорганизмов в почве условно могут быть охарактеризованы как *r*-виды – с низкой эффективностью использования субстрата, быстро растущие на легкодоступных соединениях, и *K*-стратегии – медленно, но эффективно минерализующие труднодоступный углерод (в т. ч. гуминовые вещества). Показано, что преобладание видов с *r*- или *K*-стратегией в микробном сообществе определяет скорости ростовых процессов, а конкурентные отношения микроорганизмов с разными стратегиями роста лежат в основе механизмов эмиссии, секвестрирования и оборачиваемости почвенного углерода. Воздействие таких стрессовых экологических факторов как повышенное содержание углекислого газа приводит к увеличению доли быстро растущих микроорганизмов в сообществе. Напротив, при загрязнении тяжёлыми металлами, а также дефиците влаги экологическое преимущество получают микроорганизмы с *K*-стратегией. Увеличение уровня загрязнения приводит к достоверному уменьшению максимальной удельной скорости роста и к доминированию микроорганизмов с *K*-стратегией в микробных сообществах техногенно загрязнённых почв [7, 15]. В целом смена доминирующей экологической стратегии микробного сообщества почвы является механизмом адаптации почвенных микроорганизмов к изменению экологической ситуации. Именно на понимание и управление этой адаптацией микробиома и направлено применение биогеохимических технологий. Рассмотрим различные примеры восстановления биогеохимических циклов в условиях различных загрязнений и

нарушений, прежде всего, в импактных полярных экосистемах в зонах развития газовой промышленности и выбитых оленьих пастбищах.

Биогеохимическая технология для оценки микробного загрязнения. В условиях усиления континентальности климата в полярных регионах на фоне нарушения растительного покрова как за счёт промышленной нагрузки, так и в результате перевыпаса северных оленей происходит растепление почвогрунтов. Так, в течение жаркого лета 2016 г. произошла вспышка эпидемии сибирской язвы вследствие выхода на дневную поверхность захоронений умерших ранее (в 1940-х гг.) животных, возбудителем которой является бактерия *Bacillus anthracis* [16, 18]. Развитие этой эпизоотии произошло в связи с поздним обнаружением очагов этой болезни из-за недостаточно развитой сети санитарно-эпидемиологических станций на огромной территории полуострова Ямал. Следовательно, была поставлена задача создать простую, природоподобную биогеохимическую технологию для первичной оценки микробного загрязнения.

Поставленную таким образом задачу удалось решить на основе разработанной инновационной технологии оперативной оценки микробного загрязнения природных вод, защищённой патентом на изобретение РФ № 2701554. Суть метода заключается в том, что на территории пастбищного скотоводства по карте-схеме крупного масштаба (М 1:200 000 или крупнее) определяют места выпаса скота. Затем с мест выпаса скота отбирают усреднённый репрезентативный образец навоза, который высушивают (при комнатной температуре) и просеивают (через сито диаметром ячеек 3 мм). После этого из образца получают сухие пробы навоза и водные пробы из навоза, в которых определяют микробное загрязнение на основе анализа активности фермента дегидрогеназы. В табл. 1 приведены показатели статистически доказанного микробного загрязнения воды.

Таблица 1. Идентификация микробного загрязнения водной среды из навоза крупного рогатого скота посредством анализа активности фермента дегидрогеназы

Table 1. Identification of microbial contamination of the aquatic environment from cattle manure by analyzing the enzyme dehydrogenase activity

№ пробы	Соотношение навоз:вода	Активность фермента дегидрогеназы, мкг $C_{19}H_{16}N_4/(г \cdot сут)$ [проба № 1] и мкг $C_{19}H_{16}N_4/(мл \cdot сут)$ [пробы №№ 2, 3, 4 и 5]	Количество микробов, клеток/г [проба № 1] и клеток/мл [пробы №№ 2, 3, 4 и 5]
1	1:0	667	$2,2 \cdot 10^9$
2	1:1	248	$0,7 \cdot 10^8$
3	1:2	177	$5,2 \cdot 10^6$
4	1:3	59	$1,7 \cdot 10^6$
5	1:4	33	$1,0 \cdot 10^6$

При этом значения активности фермента дегидрогеназы были подтверждены результатами анализа количества микробов, продуцирующих данный фермент в различных пробах, проведённого по общепринятой методике [14]. Из полученных аналитических данных и сравнительных исследований видно, что проба сухого навоза № 1, как первичного очага микробов, характеризуется максимальными значениями активности фермента дегидрогеназы 667 мкг $C_{19}H_{16}N_4/(г \cdot сут)$ и количеством микробов $2,2 \cdot 10^9$ клеток/г, продуцирующих данный фермент. В водных пробах навоза № 2, № 3, № 4 и № 5, как вторичного очага микробов, при расширении соотношения навоз:вода в ряду 1:1, 1:2, 1:3 и 1:4 активность фермента оказалась прямо пропорциональной

зависимости от количества микробов, т. е. чем ниже была активность дегидрогеназы, тем меньшее количество микробов идентифицировалось в водной пробе и наоборот. Следует отметить, что если результаты анализа показывают нулевое значение активности фермента дегидрогеназы, то это означает полное отсутствие микробного загрязнения водной среды из навоза.

Согласно [8], как только при избыточной пастбищной нагрузке растительный покров оказывается полностью повреждённым или фрагментированным и, соответственно, поверхность почвы обнажается, механизм эпизоотии, т. е. эпидемии у животных, запускается. Известно, что деградация растительного покрова тундры способствует формированию на положительных (выпуклых) формах рельефа обнажений почвогрунтов. Таким образом, восстановление почвенно-растительного покрова является наиболее эффективным путём предотвращения эпизоотии.

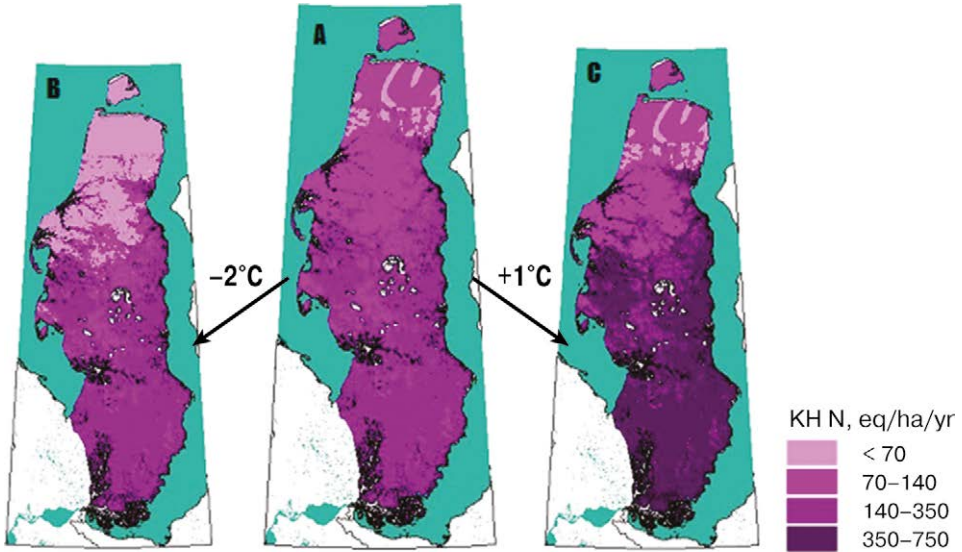
Оценка геоэкологических рисков в зоне воздействия эмиссий NO_x от Бованенковского газоконденсатного месторождения. Известно, что устойчивость техноэкосистем, т. е. экосистем, образованных под действием техногенных факторов, во многом определяется природными биогеохимическими циклами химических элементов, трансформированными в различной степени техногенной активностью. Понимание фундаментальных механизмов, регулирующих потоки веществ в биогеохимических цепях, позволяет дать количественную оценку геоэкологического риска и определить техноэкологические решения для управления им в различных техноэкосистемах.

В настоящее время общепризнана необходимость сохранения окружающей среды при освоении природных ресурсов районов российского Крайнего Севера, экосистемы которых характеризуются пониженным потенциалом устойчивости к внешним техногенным воздействиям. В число первоочередных объектов освоения входит Бованенковская группа месторождений углеводородного сырья (БГКМ), расположенная в западной части полуострова Ямал и характеризующаяся большими запасами природного газа и конденсата. Оценка геоэкологических рисков для экосистем в зоне воздействия эмиссионных выбросов БГКМ выполнена согласно стандартному алгоритму [4].

Оценка критических нагрузок подкисляющих и эвтрофирующих соединений азота для наземных экосистем полуострова Ямал при разных сценариях температурных условий. Рассчитанные величины критических нагрузок (КН) в отношении подкисляющих эффектов воздействия атмосферных выпадений изменяются в диапазоне от менее 100 до 600 экв/га в год; для большей части территории уровень поступления кислотных анионов составляет 200–400 экв/га в год. Минимальные оценки получены для болот и заболоченных экосистем, в которых отсутствует потенциал нейтрализации кислотных осадков в почвах за счёт выветривания почвенных минералов (рис. 1).

Рассчитанные величины КН питательного азота составили в среднем 140–350 экв/га в год или 2–5 кг N/га в год, что несколько ниже данных для аналогичных экосистем Северной Европы (5–10 кг N/га в год) и может объясняться пониженной продуктивностью растительных сообществ в более суровых климатических условиях полуострова Ямал. Значения КН ниже 140 экв/га в год определены для экосистем лишайниковых и лишайниково-мохово-травянистых тундр различной степени нарушенности, характеризующихся минимальными показателями выноса азота с продукцией фитомассы и иммобилизации азота в органическом веществе почв (рис. 2).

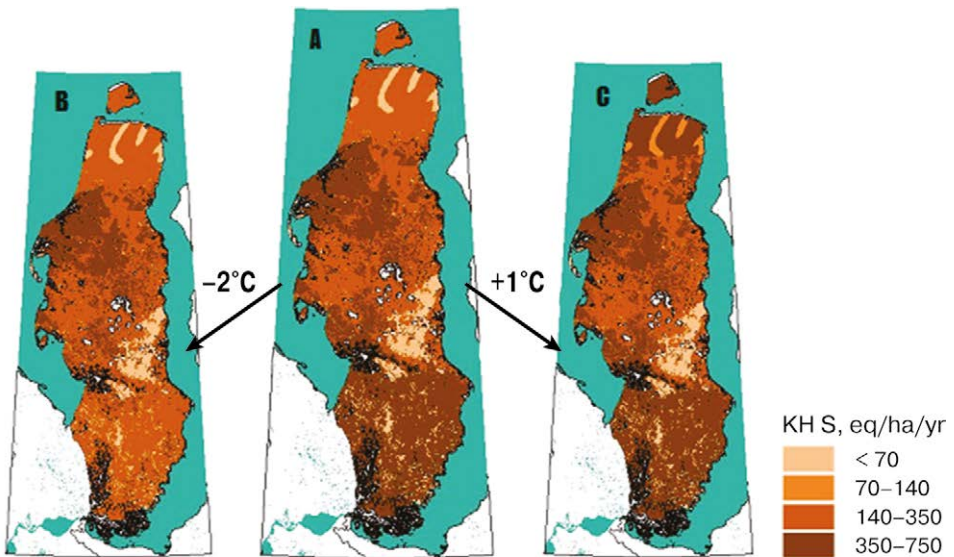
Изменение параметров масс-баланса азота в связи с усилением континентальности климата. Для экосистем полуострова Ямал экологические последствия похолодания и потепления климата будут связаны не только с изменениями средней годовой



Критические нагрузки питательного азота:

А – консервативный сценарий, В – понижение температуры на 2°C,
С – повышение температуры на 1°C

Рис. 1. Величины КН подкисляющих соединений для экосистем полуострова Ямал.
Fig. 1. Critical load values of acidifying compounds for the ecosystems of the Yamal Peninsula.



Критические нагрузки кислотности:

А – консервативный сценарий, В – понижение температуры на 2°C,
С – повышение температуры на 1°C

Рис. 2. Величины КН эвтрофирующих соединений для экосистем полуострова Ямал.
Fig. 2. Critical load values of eutrophying compounds for the ecosystems of the Yamal Peninsula.

температуры воздуха и почвенных толщ, но и комплекса зависящих от температурных условий параметров масс-баланса азота и макроэлементов. Повышение или снижение температуры скажется на интенсивности следующих ландшафтно-биогеохимических процессов:

- продуктивности фитоценозов и закреплении азота и катионов в биомассе,
- интенсивности внутрипочвенного выветривания катионов,
- скорости иммобилизации азота в почвах,
- интенсивности гидрохимического стока с водосборных территорий и, соответственно, выноса азота и макроэлементов с просачивающейся влагой,
- скорости денитрификации.

Согласно имеющимся сценариям, похолодание климата будет сопровождаться снижением в ближайшие 25 лет текущей средней годовой температуры на 2°C. Предложенный сценарий потепления климата соответствует повышению температуры на 1°C за тот же период. При этом нужно чётко понимать, что в условиях полярного климата воздействие изменяющихся температур на состояние всех компонентов экосистем может проявляться только в течение летнего периода, тогда как в течение зимнего времени любая активность заторможена. Следовательно, наблюдаемое повышение летних температур (усиление континентальности климата) соответствует сценарию потепления, а понижение температуры – похолоданию.

Продуктивность тундровых фитоценозов в значительной степени лимитируется температурными условиями. Поэтому изменения температурного режима в соответствии с предложенными сценариями будут проявляться в снижении/повышении показателей чистой продуктивности (*net primary productivity* – NPP). С использованием формулы Х. Лита [23] рассчитано, что понижение средней температуры на 2°C приведёт к снижению значений NPP и, соответственно, показателей закреплённого азота и макроэлементов в продукции фитомассы в среднем на 20 % по сравнению с консервативным сценарием. При увеличении температуры на 1°C повышение аналогичных параметров составит 11–12 %. С учётом рассчитанных для консервативного сценария значений величины поглощения азота ($N_{\text{упт}}$) 0,5–3,5 кг/га в год, изменения данного пула азота составят 0,05–0,4 кг/га в год в зависимости от типа биогеоценоза.

Внутрипочвенное выветривание катионов характеризует почвенный потенциал в отношении нейтрализации кислотной составляющей атмосферных осадков и органических кислот, образующихся при минерализации растительного опада. Известно, что скорость выветривания катионов определяется температурными условиями и текстурой почв. Рассчитанные величины изменения скорости выветривания составили для почв на песчаных отложениях 3–10 экв/га в год, а для почв суглинистого и глинистого состава – 11–35 экв/га в год. Таким образом, максимальное изменение КН кислотности в связи с увеличением температуры на 1°C не превысит 0,5 кг/га в год в расчёте на азот.

Оценка скорости *иммобилизации азота* ($N_{\text{им}}$) в тундровых почвах представляется весьма затруднительной, поскольку понижение/повышение средних температур приведёт к соответствующему изменению двух противоположных процессов: образования и минерализации органического вещества. Для консервативного сценария считали, что величина $N_{\text{им}}$ равна 0,3–0,5 кг N/га в год в зависимости от продуктивности экосистем, при условии $N_{\text{им}} < N_{\text{упт}}$. С учётом снижения продуктивности экосистем в сценарии понижения температуры, величина $N_{\text{им}}$ может быть принята равной 0,2–0,5 кг N/га в год, при повышении температуры величины иммобилизации сохранятся на уровне консервативного сценария.

Территория полуострова Ямал характеризуется повышенным увлажнением и значительно заболочена. По данным Н.Н. Бобровицкой [9], увеличение температуры примерно на 1°C за последние 100 лет привело к соответствующему повышению среднего количества осадков на 100–115 мм, что может быть использовано в рассматриваемых сценариях. Одновременно с понижением/повышением средних температур изменятся показатели эвапотранспирации. Если считать, что при этом результирующий поток инфильтрации осадков снизится/возрастёт на 50–100 мм, то значения параметра $N_{le(acc)}$ – допустимое вымывание азота – изменятся по сравнению с консервативным сценарием в среднем на 10–35 экв/га в год. Интенсивность потока критического вымывания щёлочности изменится на 10–50 экв/га в год в зависимости от типа биогеоценоза. Изменение параметров денитрификации составит от 3–5 до 50 экв/га в год в пересчёте на азот.

Изменение распределения величин КН: сценарий похолодания. В отношении кислотных эффектов получена следующая картина возможных изменений величин КН кислотности при понижении средней годовой температуры на 2°C. Основной фон значений КН по-прежнему будет равен 200–400 экв/га в год. Но при похолодании, за счёт снижения интенсивности внутрпочвенного выветривания катионов и сокращения потока критической щёлочности, уменьшится буферность экосистем в южной части полуострова – основном ареале распространения мохово-кустарничковых тундр. Снижение кислотного потенциала для этих экосистем составит около 100 экв/га в год. Таким образом, заметно сократится доля территорий, для которых значения КН кислотности соответствуют 400–600 экв/га в год.

В отношении эвтрофирующих эффектов понижение температуры на 2°C скажется, прежде всего, на самых северных экосистемах, представленных различными вариантами лишайниковых и мохово-лишайниковых тундр. Если в соответствии с консервативным сценарием КН питательного азота для этих экосистем составляют 1,5–2 кг N/га в год, то при похолодании их устойчивость в отношении процессов эвтрофирования снижается до 1–1,5 кг N/га в год.

Изменение распределения величин КН: сценарий потепления (усиления континентальности). Повышение средней годовой температуры на 1°C скажется на устойчивости экосистем к кислотной составляющей атмосферных осадков в северной субарктической зоне Ямала, где КН кислотности возрастут на 100–150 экв/га в год. Эти изменения будут результатом более интенсивного выветривания катионов в почвах и увеличения слоя инфильтрации осадков. В отношении буферного потенциала экосистем в южной части полуострова повышение температуры будет не столь заметным, составив в среднем 50 экв/га в год.

Максимальный положительный эффект от повышения температуры в отношении эффектов эвтрофирования будет характерен также для более южных экосистем, представленных вариантами наиболее продуктивных в этой зоне травянисто-кустарничково-моховых тундр. Для них рассчитанные величины КН питательного азота возрастут с 140–350 до 400–700 экв/га в год. Таким образом, допустимое поступление азота составит 5–10 кг N.

Характеристика рисков. Результаты оценки вероятности геоэкологических рисков для наземных экосистем в отношении эффектов эвтрофирования показаны на рис. 3. На всех этапах большая часть рассматриваемой территории характеризуется отсутствием превышений $КН(N)_{nat}$, рассчитанных для наиболее чувствительных к азотному загрязнению олиготрофных видов – лишайников и мхов. Высокие риски эвтрофирования прогнозируются для экосистем вблизи БГКМ после ввода в эксплуатацию дожимных компрессорных станций.

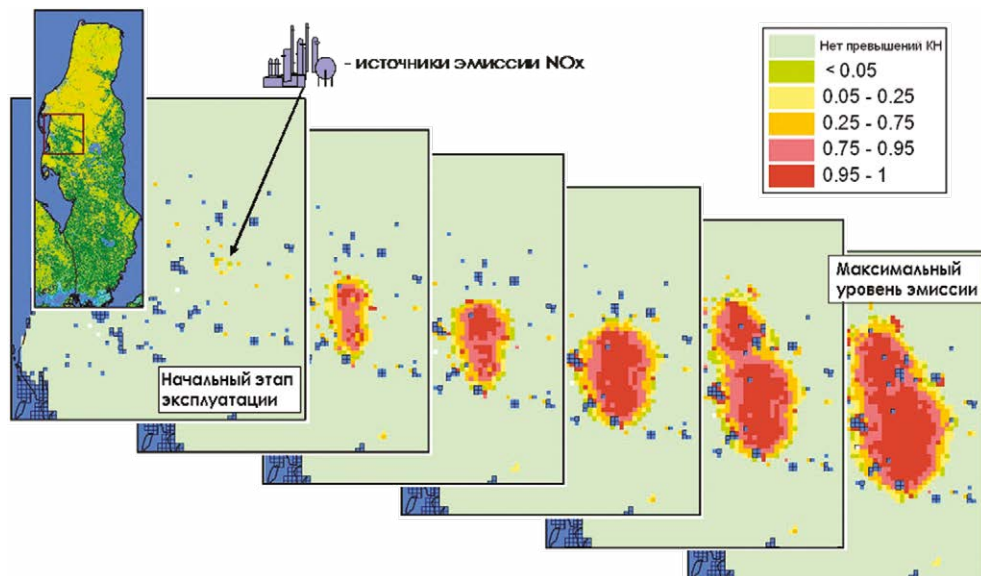


Рис. 3. Результаты расчётов рисков эвтрофирования для экосистем в зоне воздействия БГКМ при поэтапном вводе технологических установок (вероятность).

Fig. 3. Calculation results of eutrophication risks for ecosystems in the BGCF impact zone during the phased commissioning of technological installations (probability).

При максимальном уровне выбросов превышение $\text{КН}(\text{N})_{\text{нит}}$ с максимальной долей вероятности будет наблюдаться практически в пределах всей 30-километровой зоны воздействия, что может проявиться в изменении структуры растительного покрова данной территории за счёт гибели лишайниковых видов и мхов, а также исчезновения некоторых олиготрофных видов сосудистых растений. Наиболее вероятным эффектом эвтрофирования экосистем на данной территории будет увеличение численности осок и злаковых видов и повышение общей продуктивности фитоценозов, что может привести к изменению термических характеристик почвенно-растительного слоя. Другим экологическим эффектом может быть увеличение кислотности почвенно-грунтовых и поверхностных вод. С учётом того, что большая часть атмосферных выпадений азота на данной территории депонируется в снежном покрове, можно прогнозировать вынос части «избыточного» азота с талыми водами из наземных экосистем в местные водоёмы. Таким образом, «актуальные» нагрузки азота в результате экспозиции экосистем эмиссионными выбросами БГКМ составят ориентировочно около 50 % от модельных значений выпадений.

Управление природными и экологическими рисками с использованием инновационных биогеохимических технологий. Инновационные биогеохимические технологии рекультивации нарушенных и загрязнённых почв в импактных полярных экосистемах в зоне расположения лицензионных участков газодобывающих предприятий представляют собой природоподобные технологии, ориентированные на воспроизведение процессов, характерных для окружающей природной среды. Естественно, что вариации климатических параметров окружающей среды, особенно в арктической и субарктической зонах, где добывается основной объём природного газа России и широко распространено традиционное пастбищное оленеводство, повышают уровень рисков

отрицательного влияния этих факторов на газопромысловые и газотранспортные объекты газовой промышленности, а также на состояние пастбищных угодий. Сгладить их влияние и понизить вероятность развития неблагоприятных инцидентов, а также перейти к управлению природными и (гео)экологическими рисками возможно различными методами, в т. ч. за счёт технологий рекультивации нарушенных и загрязнённых почв.

Как известно, почва является средой обитания определённого сообщества микроорганизмов, семян растений и самих растений, представляя собой сложную систему, многие параметры которой сложно определимы. Однако её отклик на использование технологий биорекультивации может быть количественно измерен, в частности, в виде показателей активности ферментов дегидрогеназы и каталазы, которые определяются в условиях обычной экологической лаборатории газодобывающей компании со стандартным набором приборов, инструментов и химикатов. Благодаря такой возможности и объектно-ориентированному подходу к решению экологических проблем и удалось создать вышеупомянутые технологии. Практический опыт их применения на отдельных экспериментальных участках дал возможность расширить пул инновационных технологий для управления рассматриваемыми рисками в арктической и субарктической климатических зонах.

На сегодняшний день очевиден факт усиления континентальности климата, проявляемый в температурных аномалиях и вызываемых, прежде всего, природными факторами [1, 5, 12, 13, 17, 22]. Следствием этого является возрастание природных и (гео)экологических рисков. Природные риски, связанные с ростом летних температур (например, в ЯНАО в 2016 г.), могут проявляться в виде различных эпизоотий. Ведущим фактором проявления подобных рисков являются широкомасштабные нарушения тундровых почв, в частности, на полуострове Ямал вследствие перевыпаса оленей. Это приводит к потере пастбищных площадей. Нарушения почвенного покрова, связанные с освоением месторождений углеводородного сырья в северных регионах, имеют относительно локальный характер. Основные (гео)экологические риски связаны с воздействием предприятий ТЭК на процессы эвтрофирования тундровых экосистем, что проявляется в виде смены доминирующих видов растительности и усилении растепления почвогрунтов. На фоне наблюдаемого в последние годы усиления континентальности климата, на территории Тазовского полуострова успешно апробирована адаптивная к климатическим условиям Крайнего Севера биогеохимическая технология рекультивации тундровых почв, нарушенных вследствие добычи и транспорта природного газа, а также перевыпаса оленей, основу которой составляют специально разработанные методики, защищённые более 10 патентами Российской Федерации на изобретения.

Биогеохимические технологии для реабилитации загрязнённых и нарушенных экосистем. Биогеохимические технологии, представленные в табл. 2, регулируют работоспособность микробного звена биогеохимических круговоротов в различных природных и сельскохозяйственных экосистемах. Как правило, эти технологии включают в себя применение различных минеральных и органических удобрений, мелиорантов и отходов производства.

Необходимо подчеркнуть, что список биогеохимических технологий, представленный в табл. 2, далеко не исчерпывающий. Сюда могут быть также включены различные подходы, способствующие восстановлению нативной микрофлоры, например, при загрязнении агропочв тяжёлыми металлами и нефтепродуктами [21], как и другие приёмы и методы, направленные на регулирование биогеохимической структуры экосистем в целом.

Таблица 2. Биогеохимические технологии для управления нарушениями и загрязнениями в импактных экосистемах

Table 2. Biogeochemical technologies for the management of disturbances and pollution in impact ecosystems

Технология	Технологические принципы	Reference
1	2	3
Метод подготовки образцов для изотопного анализа азота	Оценка параметров микробной минерализации	Авторское свидетельство СССР, 1982, № 1043565
Метод определения азотминерализующей способности почв	Оценка минерализующей способности почв	Авторское свидетельство СССР, 1983 № 1206703
Метод оценки биодegradации пестицидов	Оценка восстановления нативной микрофлоры	Авторское свидетельство СССР, 1991, № 5005241
Метод оценки очищения почв от остатков пестицидов	Реабилитация загрязнённых почв	Авторское свидетельство СССР, 1994, № 1836636
Метод прогнозирования поведения азота в агроэкосистемах	Оценка минерализующей способности почв	Авторское свидетельство СССР, 1995, № 1753415
Способ контроля очистки почв, загрязнённых углеводородами, и нейтрализации углеводородных шламов посредством анализа активности каталазы	Реабилитация загрязнённых почв	Патент РФ 2387995, зарегистрирован 27.04.2010
Способ контроля очистки почв, загрязнённых углеводородами, и нейтрализации углеводородных шламов посредством анализа активности дегидрогеназы	Восстановление микробного звена биогеохимического круговорота при рекультивации загрязнённых почв	Патент РФ 2387996, зарегистрирован 27.04.2010
Способ контроля эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв различного гранулометрического состава посредством анализа активности дегидрогеназы	Восстановление микробного звена биогеохимического круговорота при рекультивации нарушенных тундровых почв	Патент РФ на изобретение №2491137, зарегистрирован 27.08.2013
Способ оценки эффективности рекультивации посредством торфа нарушенных тундровых почв с различной полной влагоёмкостью	Восстановление микробного звена биогеохимического круговорота при рекультивации нарушенных тундровых почв	Патент РФ на изобретение № 2611159, зарегистрирован 21.02.2017
Способ получения гумата калия из местных торфов Ямало-Ненецкого автономного округа	Восстановление микробного звена биогеохимического круговорота при рекультивации нарушенных тундровых почв	Патент РФ на изобретение № 2610956, зарегистрирован 17.02.2017
Способ оценки эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв посредством внесения местного торфа и гумата калия	Восстановление микробного звена биогеохимического круговорота при рекультивации нарушенных тундровых почв	Патент РФ на изобретение № 2611165, зарегистрирован 21.02.2017

1	2	3
Способ диагностики хронического и аварийного загрязнения почв тяжёлыми металлами посредством анализа активности фермента дегидрогеназы	Восстановление микробного звена биогеохимического круговорота при рекультивации загрязнённых почв	Патент РФ на изобретение № 2617533, зарегистрирован 25.04.2017
Способ биохимического контроля эффективности рекультивации нарушенных и загрязнённых тундровых почв	Восстановление микробного звена биогеохимического круговорота при рекультивации нарушенных тундровых почв	Патент РФ на изобретение № 2672490, зарегистрирован 15.11.2018
Способ идентификации источника и времени загрязнения окружающей среды и биологических субстратов человека пестицидом ДДТ в регионах Крайнего Севера	Восстановление микробного звена биогеохимического круговорота при рекультивации загрязнённых почв	Патент РФ на изобретение № 2701554, зарегистрирован 30.09.2019
Способ идентификации микробного загрязнения водной среды посредством анализа активности фермента дегидрогеназы	Оценка восстановления нативной микрофлоры при загрязнении водных экосистем	Патент РФ на изобретение № 2735 756, зарегистрирован 06.11.2020

Проблема разработки и внедрения инновационных, осуществимых, экологически чистых природоподобных технологий, направленных на восстановление нарушенных и загрязнённых экосистем, а также на увеличение запасов углерода и значительное сокращение выбросов парниковых газов во всех сельскохозяйственных районах, включая районы выращивания риса, является критически важной.

В частности, в полевых испытаниях, проведённых в провинции Хунань, Китай, было оценено поглощение диоксида углерода корнями растений риса под влиянием кремниевых удобрений. Количество дополнительного поглощённого CO_2 зависело от содержания доступного растениям Si в агрохимикатах, частоты и продолжительности их применения и гранулометрического состава почвы [24].

Полученные данные свидетельствуют о потенциале удобрений Si для стимулирования процесса связывания C и снижения выбросов ПГ при выращивании риса. Их применение обеспечило увеличение урожайности риса на 12,1–71,2 % и фиксации CO_2 корневой системой на 0,95–14,9 т/га за один сезон. Возвращение C в почву и воспроизводство плодородия может быть обеспечено за счёт усиленного развития корневой системы растений и увеличения количества корневых остатков после сбора урожая.

Следовательно, необходимо отслеживать все слагаемые биогеохимических циклов, от микробного звена до человека, как замыкающего пищевые трофические цепи.

Заключение. Проведение совместных научно-исследовательских работ с ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и ООО «Газпром добыча Ямбург» выразилось в создании целого ряда биогеохимических технологий, защищённых патентами Российской Федерации на изобретения, применительно к рекультивации и диагностике как загрязнённых, так и нарушенных почв. Показано, что необходима дальнейшая разработка и использование биогеохимических технологий, направленных на восстановление биогеохимических циклов в агроэкосистемах, в первую очередь, в микробном звене, регулирующем потоки поллютантов.

При этом необходимо понимать, что эти технологии должны быть совместимы с другими технологиями и технологическими процессами, используемыми на предприятиях, в частности, на газодобывающих предприятиях Крайнего Севера. Известно, что каждый проект обустройства нефтегазоконденсатных месторождений (НГКМ) непременно содержит раздел ОВОС (оценка воздействия на окружающую среду), в соответствии с ФЗ «Об охране окружающей среды» № 7-ФЗ, который предусматривает реализацию мероприятий по минимизации отрицательных воздействий возводимых и эксплуатируемых газопромысловых объектов на окружающую среду. Кроме этого, предусмотрены мероприятия по рекультивации нарушенных и загрязнённых земель на лицензионных участках, отведённых под указанные объекты. Все эти мероприятия в обязательном порядке выполняются и соответствующим образом контролируются.

Учитывая это, ОВОС можно считать моделью, которую используют для реализации управления процессами взаимодействия газодобывающего предприятия с окружающей средой и проведением работ по рекультивации нарушенных и загрязнённых участков (управление соответствующими технологиями и технологическими процессами). В этом смысле постановка задачи управления сходна с другими технологическими процессами, для которых благодаря объектно-ориентированному подходу удалось найти инновационные решения большого комплекса проблем, не выходя за рамки имеющегося на объектах оборудования и систем управления, таких как АСУ ТП и ИУС.

Соответственно, для построенных по проекту установкам АСУ ТП ведёт управление технологическими процессами, контролируя их соответствие моделям, заложенными в её базу данных, до тех пор, пока не возникнет неразрешимая для неё ситуация. В этот момент АСУ ТП (ИУС) формирует об этом сообщение оператору «с просьбой перейти на ручное управление и привести установку (управляемую систему) в состояние, когда она (АСУ ТП), как управляющая система, сможет снова вести управление процессом». По факту – АСУ ТП (ИУС) ставит вопрос о нерешённой её проектировщиками проблеме, и эту проблему необходимо увидеть и решить именно здесь – т. е. реализовать на практике объектно-ориентированный подход к выявлению причин возникновения проблемы и поиску путей её решения силами самой АСУ ТП (ИУС).

Хорошо известно, что реализация мероприятий, предусмотренных ОВОС, не всегда достигает поставленной цели. Причин этого достаточно много, но в каждом случае они конкретны и связаны как с особенностями технологического объекта, так и с индивидуальными характеристиками окружающей среды, часть из которых просто не выявлена или неизмерима существующими методами и измерительными комплексами, либо взаимосвязь объекта с окружающей средой не может быть выражена в явной форме, хотя бы из-за недостатка наших знаний об окружающей среде и процессах её жизнедеятельности.

Вот в таких ситуациях «объектно-ориентированный подход» к возникшей проблеме и выручает. В случае взаимодействия с окружающей средой, на конкретной территории в рамках того же ОВОС необходимо грамотно «задавать вопросы» окружающей среде и уметь понимать «её ответы» на эти вопросы, а заодно и понимать, как она ставит нам свои вопросы и грамотно отвечать на них. Это и есть основная цель грамотной организации управления взаимодействием с окружающей средой, позволяющего обеспечить устойчивость экосистем в зонах газодобычи. Как показано, применение биогеохимических технологий в рамках такого универсального, объектно-ориентированного подхода к решению подобного типа задач даёт требуемые результаты (рис. 4).

Такой подход к решению проблем, как правило, оказывается и малозатратным, т. е. не требующим каких-то значительных дополнительных капиталовложений в его

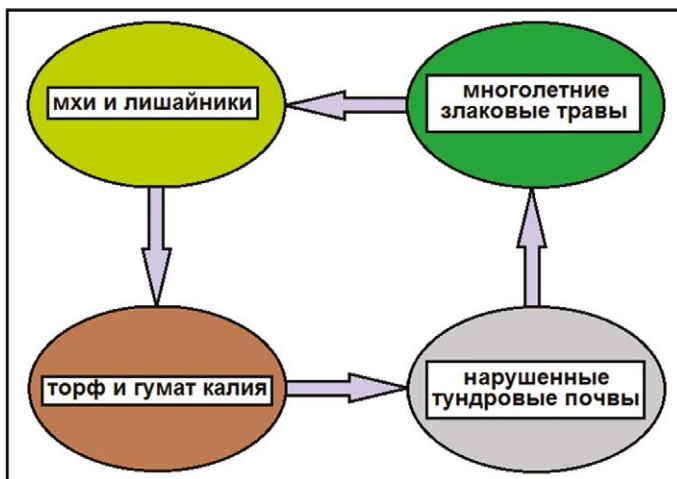


Рис. 4. Схема адаптивной к климатическим условиям Крайнего Севера биогеохимической технологии рекультивации нарушенных тундровых почв.

Fig. 4. Scheme of a biogeochemical technology for recultivation of disturbed tundra soils, adaptive to the climatic conditions of the Far North.

реализацию по сравнению с запланированными в ОВОС, т. к. осуществляется в большинстве случаев на имеющемся у предприятий оборудовании и кадрами стандартной для предприятия квалификации по штатному расписанию [2, 6].

Понимание количественных закономерностей биогеохимической организованности в импактных экосистемах всегда базируется на фундаментальных знаниях в рамках биогеохимического инжиниринга и, как правило, завершается разработкой инновационных биогеохимических технологий управления устойчивостью экосистем в зонах газодобычи. Инновационный характер найденных решений всегда подтверждается их защитой патентами на изобретения РФ, а обобщение результатов внедрения найденных решений позволяет существенно расширить область их применения. Это ещё раз подтверждает, что биогеохимические технологии характеризуют развитие фундаментальных биогеохимических идей В.И. Вернадского до реализации инновационных практических решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдусаматов Х.И. Лунная обсерватория для исследований климата в эпоху глубокого похолодания // Солнечная и солнечно-земная физика – 2017. Тр. XXI Всерос. ежегодной конф. по физике Солнца. СПб, 2017. С. 3–6.
2. Арно О.Б., Арабский А.К., Башкин В.Н. Инновационное развитие ООО «Газпром добыча Ямбург». Сходство и различие в методах предупреждения потенциальных катастроф // Газовая промышленность. 2021. Т. 184, № 1. С. 26–34.
3. Башкин В.Н. Инженерная биогеохимия и биогеохимические технологии // Инноватика и экспертиза. Т. 23, № 2. С. 140–144.
4. Башкин В.Н., Припутина И.В. Управление экологическими рисками при эмиссии поллютантов. М.: Газпром-ВНИИГАЗ, 2010. 189 с.
5. Башкин В.Н., Арно А.Б., Арабский А.К., Барсуков П.А., Припутина И.В., Галиулин Р.В. Ретроспектива и прогноз геоэкологической ситуации на газоконденсатных месторождениях Крайнего Севера. М.: Газпром-ВНИИГАЗ, 2012. 280 с.
6. Башкин В.Н., Галиулин Р.В. Геоэкологические проблемы при добыче газа в Западной Сибири: пути решения // Жизнь Земли. 2019. Т. 41, № 3. С. 264–271. DOI: 10.29003/m669.0514-7468.2019_41_3/264-271.

7. *Благодатская Е.В., Семёнов М.В., Якушев А.В.* Активность и биомасса почвенных микроорганизмов в изменяющихся условиях окружающей среды. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 243 с.
8. *Богданов В.Д., Головатин М.Г.* Эколого-социально-экономический аспект эпизоотий северного оленя на Ямале (на примере сибирской язвы) // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2017. Т. 94, № 1. С. 4–10.
9. *Бобровицкая Н.Н.* Современное состояние климата и последствия его изменения (на примере территории РФ и применительно к полуострову Ямал): техн. документ // СПб: ГУ «ГГИ», 2007. 5 с.
10. *Вернадский В.И.* Проблемы биогеохимии. М.–Л: Изд-во АН СССР, 1939. Вып. 2. 34 с.
11. *Ермаков В.В., Карпова Е.А., Корж В.Д., Остроумов С.А.* Инновационные аспекты биогеохимии. М.: ГЕОХИ РАН, 2012. 345 с.
12. *Ефимов В.И.* Реальность углеродного следа в глобальном изменении климата // Жизнь Земли. 2021. Т. 43, № 3. С. 328–335. DOI: 10.29003/ m2437.0514-7468.2020_43_3/328-335.
13. *Захарова М.И.* Оценка потенциального риска при истечении газа на надземных участках газопровода с учётом аномальных метеоусловий Севера // Проблемы анализа риска. Т. 19, № 6. С. 62–69. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-6-62-69>.
14. *Звягинцев Д.Г., Асеева И.В., Бабьева И.П., Мирчинк Т.Г.* Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. С. 15–20, 34–38.
15. *Помазкина Л.В., Котова Л.Г., Лубнина Е.В.* Биогеохимический мониторинг и оценка режимов функционирования агроэкосистем на техногенно загрязняемых почвах. Новосибирск: Наука, 1999. 207 с.
16. *Попова А.Ю., Демина Ю.В., Ежлова Е.Б., Куличенко А.Н., Рязанова А.Г., Малеев В.В., Плоскирева А.А., Дятлов И.А., Тимофеев В.С., Нечепуренко Л.А., Харьков В.В.* Вспышка сибирской язвы в Ямало-Ненецком автономном округе в 2016 году, эпидемиологические особенности // Проблемы особо опасных инфекций. 2016. № 4. С. 42–46.
17. *Снакин В.В.* Неустойчивость природных процессов: глобальный климат // Использование и охрана природных ресурсов России. 2022. № 3 (171). С. 3–12.
18. *Шестакова И.В.* Сибирская язва ошибок не прощает: оценка информации после вспышки на Ямале летом 2016 года // Журнал инфектологии. 2016. № 8 (3). С. 5–27.
19. *Bashkin V.* Biogeochemical technologies for managing pollution in polar ecosystems // Environmental Pollution. Vol. 26. Springer: Switzerland, 2016. 219 p.
20. *Bashkin V.* Ecological and biogeochemical cycling in impacted polar ecosystems. NOVA Publishers, 2017. 308 p.
21. *Bashkin V.N.* Biogeochemical Engineering: Technologies for Managing Environmental Risks // Adv Environ Eng Res. 2022. V. 3, no 4. P. 40. DOI:10.21926/aeer.2204040.
22. *Bashkin V.N., Galiulin R.V.* Geocological Risk Management in Polar Areas // Environmental Pollution. Switzerland: Springer, 2019. 155 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-04441-1>.
23. *Leith Y.* Modelling the primary productivity of the World. (Eds H. Leith & R.H. Whittaker) Priming productivity of the biosphere // Ecological Studies. 1975. V. 14, Springer-Verlag, NY. 124 p.
24. *Zhao Dan-dan, Zhang Peng-bo, Bocharnikova E.A., Matichenkov V.V., Khomiakov D.M., Pakhnenko E.P.* The evaluation of the carbon sequestration by rice roots under silicon fertilization // Herald of Moscow state university. Soil Science ser. 2019. № 3. P. 17–22.

REFERENCES

1. *Abdusamatov, H.I.,* “Lunar observatory for climate research in the era of deep cooling”, *Solar and solar-terrestrial physics – 2017. Proc. of the XXI All-Russian Annual Conference on Solar Physics* (Saint Petersburg, 2017. P. 3–6) (in Russian).
2. *Arno, O.B., Arabsky, A.K., Bashkin, V.N.,* “Innovative development of Gazprom Dobycha Yamburg LLC. Similarity and difference in the methods for preventing potential disasters”, *Gas industry* 184, no 1, 26–34 (2021) (in Russian).
3. *Bashkin, V.N.,* “Engineering biogeochemistry and biogeochemical technologies”, *Innovatika i expertiza* 23, no 2, 140–144 (in Russian).
4. *Bashkin, V.N., Pripulina, I.V.,* *Environmental risk management in the emission of pollutants* (Moscow: Gazprom–VNIIGAZ, 2010) (in Russian).
5. *Bashkin, V.N., Arno, A.B., Arabsky, A.K., Barsukov, P.A., Pripulina, I.V., Galiulin, R.V.,* *Retrospective and forecast of the geocological situation at the gas condensate fields of the Far North* (Moscow: Gazprom–VNIIGAZ, 2012) (in Russian).

6. Bashkin, V.N., Galiulin, R.V., "Geocological problems in gas production in Western Siberia: solutions", *Zhizn Zemli* [Life of the Earth] 41, no 3, 264– 271 (2019). DOI: 10.29003/m669.0514-7468.2019_41_3/264-271 (in Russian).
7. Blagodatskaya, E.V., Semenov, M.V., Yakushev, A.V., *Activity and biomass of soil microorganisms in changing environmental conditions* (Moscow: Association of Scientific Publications of the CMC, 2016) (in Russian).
8. Bogdanov, V.D., Golovatin, M.G., "Ecological-socio-economic aspect of reindeer epizootics in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug (on the example of anthrax)", *Sci Bull. of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug* 94, no 1, 4–10 (2017) (in Russian).
9. Bobrovitskaya, N.N., *Current state of the climate and consequences of its change (on the example of the territory of the Russian Federation and in relation to the Yamal Peninsula)*. Tech. Document (Saint Petersburg: GU "GGI", 2007) (in Russian).
10. Vernadsky, V.I., *Problems of biogeochemistry*. Is. 2. (Moscow–Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1939) (in Russian).
11. Ermakov, V.V., Karpova, E.A., Korzh, V.D., Ostroumov, S.A., *Innovative aspects of biogeochemistry* (Moscow: GEOHI RAS, 2012) (in Russian).
12. Efimov, V.I., "Reality of the carbon footprint in global climate change", *Zhizn Zemli* [Life of the Earth] 43, no 3, 328–335 (2021). DOI: 10.29003/ m2437.0514-7468.2020_43_3/328-335 (in Russian).
13. Zakharova, M.I., "Assessment of the potential risk of gas leakage in the aboveground sections of the gas pipeline, taking into account abnormal weather conditions of the North", *Problems of risk analysis* 19, no 6, 62–69 (2022). <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-6-62-69> (in Russian).
14. Zvyagintsev, D.G., Aseeva, I.V., Babyeva, I.P., Mirchink, T.G., *Methods of soil microbiology and biochemistry* (Moscow: Publishing House of Moscow Univ., 1980) (in Russian).
15. Pomazkina, L.V., Kotova, L.G., Lubnina, E.V., *Biogeochemical monitoring and evaluation of the modes of functioning of agroecosystems on technogenically polluted soils* (Novosibirsk: Nauka, 1999) (in Russian).
16. Popova, A.Yu., Demina, Yu.V., Yezhlova, E.B., Kulichenko, A.N., Ryazanova, A.G., Maleev, V.V., Ploskireva, A.A., Dyatlov, I.A., Timofeev, V.S., Nechepurenko, L.A., Kharkiv, V.V., "Anthrax outbreak in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug in 2016, epidemiological features", *Problems of especially dangerous infections* 4, 42–46 (2016) (in Russian).
17. Snakin, V.V., "Instability of natural processes: global climate", *Use and protection of natural resources of Russia* 3 (111), 3–12 (2022) (in Russian).
18. Shestakova, I.V., "Anthrax does not forgive mistakes: assessment of information after the outbreak in the Yamal in the summer of 2016", *J. of Infectology* 8 (3), 5–27 (2016) (in Russian).
19. Bashkin, V.N., "Biogeochemical technologies for managing pollution in polar ecosystems", *Environmental Pollution* 26 (Springer: Switzerland, 2016).
20. Bashkin, V.N., *Ecological and biogeochemical cycling in impacted polar ecosystems* (NOVA Publishers, 2017).
21. Bashkin, V.N., "Biogeochemical Engineering: Technologies for Managing Environmental Risks", *Adv. Environ. Eng. Res.* 3, no 4, 040 (2022). DOI:10.21926/aer.2204040.
22. Bashkin, V.N., Galiulin, R.V., "Geocological Risk Management in Polar Areas", *Environmental Pollution* 28 (Springer, Switzerland, 2019). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-04441-1>.
23. Leith, Y., "Modelling the primary productivity of the World. (Eds H. Leith & R.H. Whittaker) Priming productivity of the biosphere", *Ecological Studies* 14 (NY: Springer-Verlag, 1975).
24. Zhao, Dan-dan, Zhang, Peng-bo, Bocharnikova, E.A., Matichenkov, V.V., Khomiakov, D.M., Pakhnenko, E.P., "The evaluation of the carbon sequestration by rice roots under silicon fertilization", *Herald of Moscow state university. Soil Science ser.* 3, 17–22 (2019).