

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЙ ИНЖИНИРИНГ

© 2023 г. В. Н. Башкин*

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
ул. Институтская, 2-2, Пущино, Московская обл., 142290 Россия*

**e-mail: vladimirbashkin@yandex.ru*

Поступила в редакцию 02.03.2023 г.

После доработки 11.05.2023 г.

Принята к публикации 18.05.2023 г.

В статье рассмотрена возможность перехода от фундаментальных идей В.И. Вернадского к биогеохимическим технологиям. Показано, что с использованием предлагаемых технологий происходит восстановление биогеохимических (БГХ) циклов, прежде всего, в микробном звене. Приведены примеры оценки микробного загрязнения. Также с применением биогеохимических подходов оценены величины геоэкологического риска в условиях функционирования газовой промышленности в полярных экосистемах. Рассмотрена совместимость предлагаемых технологий с имеющимися производственными подходами, в частности, ОВОС (оценка воздействия на окружающую среду). Даны решения проблемы адаптивной рекультивации нарушенных тундровых почв на фоне усиления континентальности климата. В конечном итоге показан набор биогеохимических технологий, защищенных патентами РФ.

Ключевые слова: биогеохимический инжиниринг, нарушенные и загрязненные почвы, микробное загрязнение, рекультивация, геоэкологические риски, биогеохимические технологии

DOI: 10.31857/S0016752523100023, **EDN:** FRVOQQ

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 (Вернадский, 1939).

Для параметризации разномасштабных локальных, региональных и глобальных изменений вследствие природных и антропогенных воздействий необходимо количественное понимание и моделирование структуры биогеохимических циклов, и это представляется одним из фундаментальных направлений современной науки. Такой подход позволяет вычленить ряд новых направлений развития биогеохимических исследований, на стыке именно фундаментальных и прикладных исследований (Ермаков и др., 2012). Формируется новая область исследований — инженерная биогеохимия, в рамках которой происходит развитие инновационных биогеохимических технологий (Башкин, 2018). Биогеохимические технологии — технологии и технологические процессы, основанные на моделировании, понимании и управлении биогеохимическими циклами. Это природоподобные технологии, позволяющие с использованием естественных средств восстанавливать природные биогеохимические циклы. Об-

ласти использования — прежде всего, рекультивация загрязненных и нарушенных почв. Также они нашли широкое применение при расчетах биогеохимических стандартов, риск-менеджменте, производстве биотоплива и для других природно-ориентированных процессов (Bashkin, 2016, 2017; Bashkin, Galiulin, 2019).

Основная цель данной статьи заключается в представлении теоретически и практически обоснованных биогеохимических технологий объектно-ориентированной рекультивации загрязненных 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. Данная цель достигается путем решения целого ряда задач, а именно:

- рассмотрения состояния микробиома в нарушенных и загрязненных экосистемах;
- представления теоретических основ оценки геоэкологического риска в условиях техногенеза и ее практического приложения к условиям функционирования газовой промышленности;
- представления собственно биогеохимических объектно-ориентированных технологий рекультивации и диагностики загрязненных и нару-

шенных тундровых почв, и результатов их апробации на конкретных территориях;

– решения проблемы адаптивной рекультивации нарушенных тундровых почв на фоне усиления континентальности климата, отмеченного рядом авторов (Абдусаматов, 2014, 1917; Башкин и др., 2012; Маркелов и др., 2013; Bashkin, 2019; Захарова, 2022).

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

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 том числе 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 тяжелыми 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-загрязненных и нарушенных почв (Благодатская и др., 2016). 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.

Оценка и восстановление микробного звена биогеохимических циклов

В условиях усиления континентальности климата в полярных регионах на фоне нарушения растительного покрова как за счет 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 и возбудителем которой является бактерия *Bacillus anthracis* (Попова и др., 2016; Шестакова, 2016). Развитие этой эпизоотии произошло и 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, защищенной патентом на изобретение РФ. Суть метода заключается в том, что на территории пастбищного скотоводства, по карте-схеме крупного масштаба (М 1 : 200000 или крупнее) определяют места выпаса скота. Затем с мест выпаса скота отбирают образцы навоза, который высушивают (при комнатной температуре) и просеивают (через сито диаметром ячеек 3 мм). После этого, из образца получают сухие 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.

При этом значения активности фермента дегидрогеназы были подтверждены результатами анализа количества микробов, продуцирующих данный фермент в различных пробах, проведенного по общепринятой методике (Звягинцев и др., 1980). 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 C₁₉H₁₆N₄/(г сут), и количеством микробов, 2,2 × 10⁹ 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 в прямо пропорциональной зависимости от количества микробов. Следует отметить, что если результаты анализа показывают нулевое значение активности фермента дегидрогеназы, то это означает полное отсутствие микробного загрязнения водной среды из навоза.

Предложенный метод позволяет оперативно (в течение 1 сут):

– идентифицировать микробное загрязнение водной среды из навоза скота, происходящее в результате просачивания через навоз дождевых и

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

№ пробы	Соотношение навоз : вода	Активность фермента дегидрогеназы, мкг 2,3,5-трифенилформазона- $C_{19}H_{16}N_4$ /(г сут) [проба № 1] и мкг $C_{19}H_{16}N_4$ /(мл 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	2.2×10^9
2	1 : 1	248	0.7×10^8
3	1 : 2	177	5.2×10^6
4	1 : 3	59	1.7×10^6
5	1 : 4	33	1.0×10^6

талых вод, которые образуют поверхностные и внутрипочвенные стоки;

— обеспечить высокую точность и качество оценки эпидемиологической ситуации, вызванной патогенными микробами на территориях пастбищного скотоводства, первичным очагом которых может быть навоз больных животных;

— обосновать принятие профилактических или ремедиационных мер, чтобы избежать инфицирования местного населения через загрязненные поверхностные и подземные водоисточники, используемые для питьевых целей.

Согласно (Богданов, Головатин, 2017), как только при избыточной пастбищной нагрузке растительный покров оказывается полностью поврежденным 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 путем 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 технологические решения для управления им в различных техноэкосистемах.

Кроме того, необходимо уметь предсказывать вероятность проявления негативного воздействия того или иного загрязнителя, также, как и размеры необходимой ремедиации экосистем (их очищения и восстановления), различные компоненты которых загрязнены и нарушены вследствие техногенеза. При попытке ответить на эти вопросы возникает неопределенность, связанная с недостаточными или неточными знаниями о взаимодействии загрязнителя и окружающей среды.

Следовательно, разработан ряд подходов на основе оценки геоэкологического риска (ГЭР), применяемой в тех случаях, когда невозможно дать однозначный ответ о воздействии техногенного загрязнения на состояние окружающей среды и здоровье человека. Однако, поскольку вредное воздействие проявляется практически всегда и варьируется лишь уровень нанесения ущерба, то требуемый ответ должен содержать в себе оценку именно вероятности проявления ГЭР. Кроме того, необходимо ответить на вопрос о допустимости риска для различных экосистем и человека. Возникает и обратная задача — насколько изменяемая природная среда влияет на устойчивость функционирования промышленности.

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 величин ГЭР для экосистем в зоне воздействия эмиссионных выбросов БГКМ выполнена согласно стандартному алгоритму (Башкин, Припутина, 2010).

Оценка критических нагрузок подкисляющих и эвтрофирующих соединений азота для наземных экосистем полуострова Ямал при разных сценариях температурных условий

Под критическими нагрузками (КН) понимается допустимый уровень поступления загрязняющих веществ в экосистему, при котором не происходит необратимого разрушения биогеохимической цикличности. Если существующий уровень техногенного поступления поллютантов выше величин КН, выполняется количественная оценка превышений КН, значения которых, являясь показателем (гео)экологических рисков, определяют параметры необходимого снижения техногенных нагрузок, например, эмиссий кислотообразующих и эвтрофирующих соединений, эмитируемых при функционировании газовой промышленности.

Для расчетов величин КН были использованы следующие уравнения:

Базовый алгоритм расчета величин КН кислотности основан на использовании закона эквивалентов в соответствии с уравнением (1).

$$KH(S)_{\max} = BC_{dep} + BC_w - Cl_{dep} - BC_{upt} - ANC_{le(crit)}, \quad (1)$$

где BC_{dep} — поступление в экосистему катионов Са, Mg, К, Na с атмосферными выпадениями; BC_w — внутрипочвенное выветривание катионов Са, Mg, К, Na; Cl_{dep} — поступление анионов Cl с атмосферными выпадениями; BC_{upt} — вынос катионов Са, Mg, К из почв растительностью за счет корневого питания; $ANC_{le(crit)}$ — критическое вымывание щелочности. Единицы измерения значений всех параметров данного уравнения — грамм-эквивалент на гектар в год (г-экв/га в год).

Критическая нагрузка эвтрофирующего питательного азота ($KH(N)_{nutr}$) рассчитывается согласно уравнению (2).

$$KH(N)_{nutr} = KH(N)_{\min} + N_{le(acc)}/(1 - f_{de}), \quad (2)$$

где $KH(N)_{\min}$ — величина критической нагрузки минимального азота; $N_{le(acc)}$ — допустимое вымывание азота из почв в почвенно-грунтовые воды; f_{de} — коэффициент денитрификации.

Рассчитанные **величины критических нагрузок 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 (прежде всего, гидрокарбонаты, сульфаты, хлориды) составляет 200–400 экв/га в год. (Здесь и далее более подробное обсуждение исходных данных и литературных источников представлено в монографиях — Башкин, Припутина, 2010; Bashkin, 2017). Минимальные оценки получены для болот и заболоченных экосистем, в ко-

торых отсутствует потенциал нейтрализации кислотных осадков в почвах за счет выветривания почвенных минералов (рис. 1).

Рассчитанные **величины КН эвтрофирующих соединений азота (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 температуры воздуха и почвенных толщ, но и комплексов масс-баланса азота и макроэлементов (Р, К, Са, Mg и др.). Повышение-снижение температуры скажется на интенсивности следующих ландшафтно-биогеохимических процессов: к-са зависящих от температурных условий пара

- продуктивности фитоценозов и закреплении азота и катионов (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} и др.) в биомассе,
- интенсивности внутрипочвенного выветривания катионов (прежде всего, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , а также соответствующих форм Al, Sr и др.),
- скорости иммобилизации азота в почвах,
- интенсивности гидрохимического стока с водосборных территорий и, соответственно, выноса азота и макроэлементов (Р, К, Са, Mg и др.) с просачивающейся влагой,
- скорости денитрификации.

Для целей данной работы было принято, что 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 четко 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 биогеохимическая активность практически заторможена. Следовательно, наблюдаемое повышение летних температур (усиление континентальности климата) соответствует сценарию потепления, а понижение температуры — похолоданию.

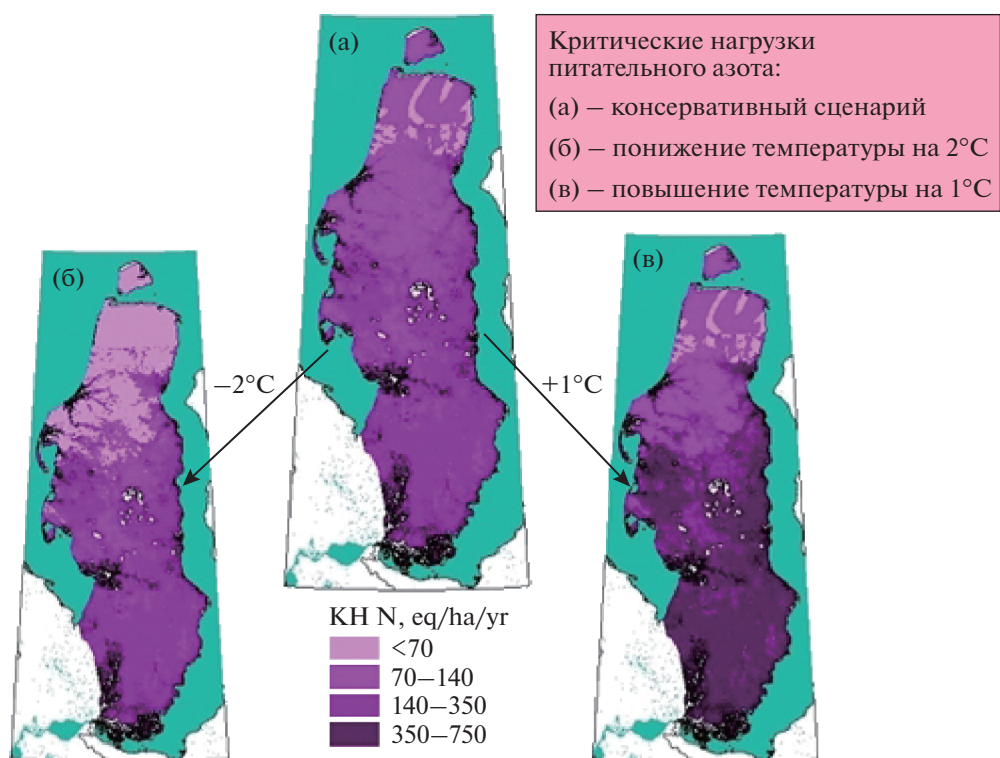


Рис. 1. Величины КН подкисляющих соединений (серы и азота) для экосистем полуострова Ямал.

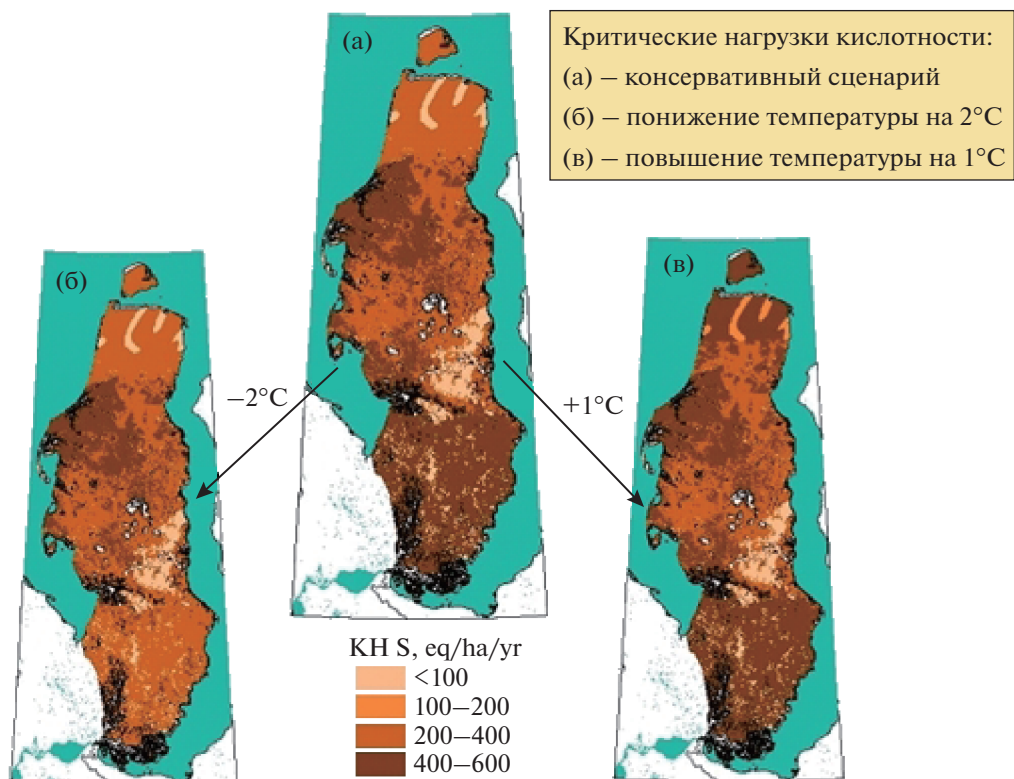


Рис. 2. Величины КН эвтрофирующих соединений азота для экосистем полуострова Ямал.

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). Используя формулу Х. Лита (Leith, 1975) рассчитано, что понижение средней температуры на 2°C приведет к снижению значений NPP и, соответственно, показателей закрепления 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 учетом рассчитанных для консервативного сценария значений величины поглощения азота (N_{upt}) 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 расчете на азот.

Оценка скорости **иммобилизации азота** (N_{im}) в тундровых почвах представляется весьма затруднительной, поскольку понижение/повышение средних температур приведет к соответствующему изменению двух противоположных процессов: образования и минерализации органического вещества. Для консервативного сценария считали, что величина N_{im} равна 0.3–0.5 кг N/га в год в зависимости от продуктивности экосистем; при условии $N_{im} < N_{upt}$. С учетом снижения величин NPP в сценарии понижения температуры, величина N_{im} 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 (2007), 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

результатирующий поток инфильтрации осадков снизится/возрастет 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 щелочности** 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 пересчете 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 счет снижения интенсивности внутрипочвенного выветривания катионов и сокращения потока критической щелочности 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. Та-

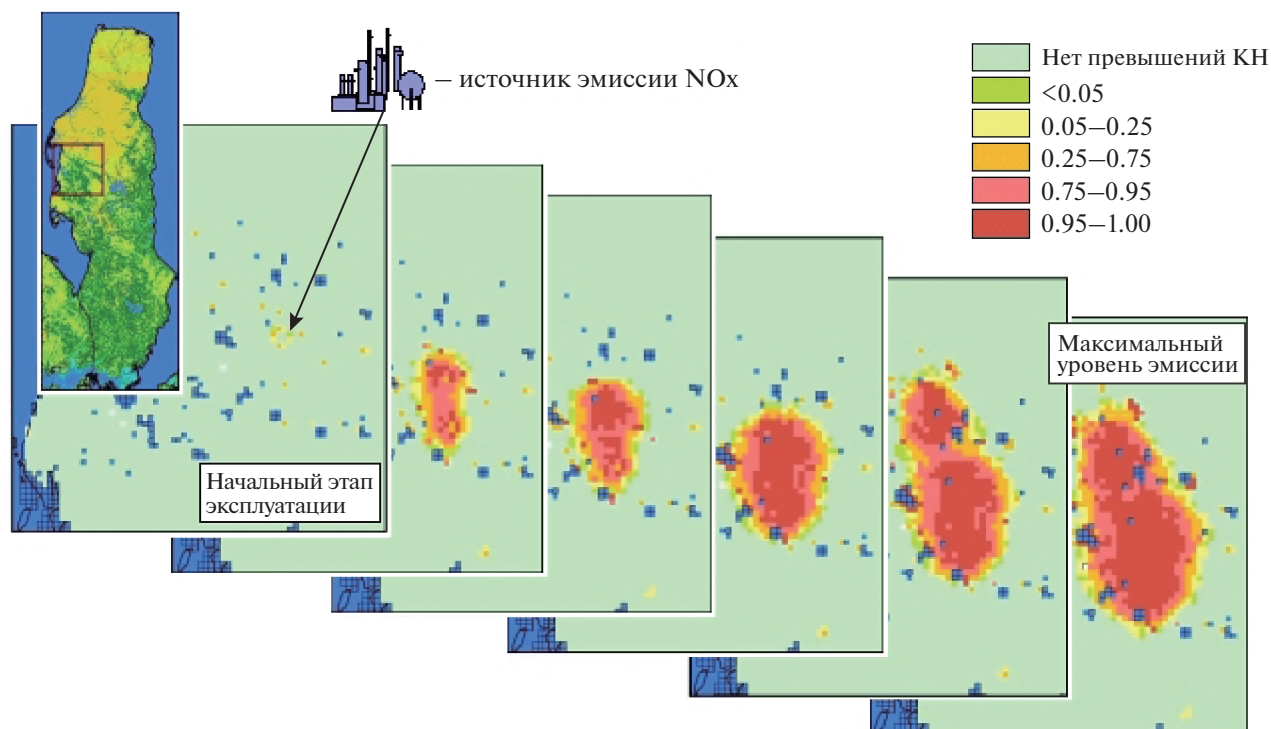


Рис. 3. Результаты расчетов рисков эвтрофирования для экосистем в зоне воздействия БГКМ при поэтапном вводе технологических установок (%).

ким образом, допустимое поступление азота составит 5–10 кг N.

ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ 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 $КН(N)_{\text{nut}}$, 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.

При максимальном уровне выбросов превышение $КН(N)_{\text{nut}}$ 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 счет 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 фитоцено-

зов, что может привести к изменению термических характеристик почвенно-растительного слоя. В общем случае, другим экологическим эффектом может быть увеличение кислотности почвенно-грунтовых и поверхностных вод (Моисеенко и др., 2016). С учетом 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 водоемы. 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 загрязненных 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. Естественным, что вариации климатических параметров окружающей среды, особенно в арктической и субаркти-

ческой зонах, где добывается основной объем 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 геоэкологическими рисками возможно различными методами, в том числе, за счет технологий рекультивации нарушенных и загрязненных почв.

Как известно, почва является средой обитания определённого сообщества микроорганизмов, семян растений и самих растений, представляя собой сложную систему, многие параметры которой не определимы. Однако ее 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. 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 (Bashkin, Galiulin, 2019).

На сегодняшний день, очевиден факт усиления континентальности климата, проявляемый в температурных аномалиях. Следствием этого является возрастание природных и геоэкологических 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 геоэкологические риски связаны с воздействием предприятий ТЭК (топливно-энергетического комплекса) 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, защищенные более 10 патентами Российской Федерации на изобретения (табл. 2).

Биогеохимические технологии для реабилитации загрязненных и нарушенных экосистем

Биогеохимические технологии, представленные в табл. 2, регулируют работоспособность микробного звена биогеохимических круговоротов в различных импактных экосистемах.

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 тяжелыми металлами и нефтепродуктами (Bashkin, 2022), как и другие приёмы и методы, направленные на регулирование биогеохимической структуры экосистем в целом. Показано, что необходима дальнейшая разработка биогеохимических технологий, направленных на восстановление БГХ циклов также и в агроэкосистемах, в первую очередь, в микробном звене, регулирующем потоки поллютантов.

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

Совместимость биогеохимических технологий с производственными процессами

Проведение совместных научно-исследовательских работ с ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и ООО «Газпром добыча Ямбург» выразилось в создании целого ряда биогеохимических технологий для рекультивации и диагностики как загрязненных, так и нарушенных почв.

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 непременно содержит раздел ОВОС, 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. И все эти мероприятия в обязательном порядке выполняются и соответствующим образом контролируются.

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

Технология	Технологические принципы	Патенты/ссылки
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 биodeградации пестицидов	Оценка восстановления нативной микрофлоры	Авторское свидетельство СССР, 1991, № 5005241
Метод оценки очищения почв от остатков пестицидов	Реабилитация загрязненных почв	Авторское свидетельство СССР, 1994, № 1836636
Метод прогнозирования поведения азота в агроэкосистемах.	Оценка минерализующей способности почв	Авторское свидетельство СССР, 1995, № 1753415
Биогеохимический мониторинг и оценка режимов функционирования агроэкосистем на техногенно загрязняемых почвах	Реабилитация загрязненных почв	(Помазкина и др., 1999)
Способ контроля очистки почв, загрязненных углеводородами, и нейтрализации углеводородных шламов посредством анализа активности каталазы	Реабилитация загрязненных почв	Патент РФ 2387995, зарегистрирован 27.04.2010
Способ контроля очистки почв, загрязненных углеводородами, и нейтрализации углеводородных шламов посредством анализа активности дегидрогеназы	Восстановление микробного звена биогеохимического круговорота при рекультивации загрязненных 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 влагоемкостью	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
Способ диагностики хронического и аварийного загрязнения почв тяжелыми металлами посредством анализа активности фермента дегидрогеназы	Восстановление микробного звена биогеохимического круговорота при рекультивации загрязненных почв	Патент РФ на изобретение № 2617533, зарегистрирован 25.04.2017
Способ биохимического контроля эффективности рекультивации нарушенных и загрязненных 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 загрязненных 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 № 2735756, зарегистрирован 06.11.2020

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 постановки 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 (автоматическая система управления технологическими процессами и интеллектуальные управляющие системы).

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 ее жизнедеятельности.

Понимание количественных закономерностей биогеохимической организованности в импактных экосистемах всегда базируется на фундаментальных знаниях в рамках биогеохимического инжиниринга и, как правило, завершается разработкой инновационных природоподобных биогеохимических технологий управления устойчивостью экосистем в зонах газодобычи. Именно такие технологии являются наиболее работоспособными в условиях полярных экосистем. Инновационный характер найденных решений, как правило, подтверждается их защитой патентами на изобретения РФ, а обобщение результатов внедрения найденных решений позволяет существенно расширить область их применения.

Следовательно, это ещё раз подтверждает, что биогеохимические технологии характеризуют развитие фундаментальных биогеохимических идей В.И. Вернадского до реализации инновационных практических решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На всем протяжении импактных северных полярных экосистем с запада на восток, от Архангельской области до архипелага Новосибирские острова, загрязнение почв при функционировании газовой и нефтяной отраслей, других промыш-

ленных объектов и инфраструктуры арктических островов происходит различными химическими веществами, среди которых преобладают углеводороды и тяжелые металлы. При этом нарушение почвенно-растительного покрова импактных полярных экосистем имеет место не только при техногенном воздействии, а большей частью при миграции многотысячных оленьих стад. Кроме того, подверженность части исследуемых полярных экосистем воздействию нефтегазовой отрасли и инфраструктуры арктических островов позволило их определить, как импактные полярные экосистемы и использовать в качестве объектов исследований с целью оценки возможностей управления возникающими геоэкологическими рисками. Под последними подразумевается вероятность деградации окружающей среды или перехода ее в неустойчивое состояние, главным образом вследствие техногенного воздействия, приводящим к нарушениям функционирования и самих технических систем.

Полученные данные позволили разработать комплекс биогеохимических технологий, защищенных патентами РФ, применительно как к оценке геоэкологического риска нарушения биогеохимической структуры экосистем, так и к рекультивации и диагностике как загрязненных, так и нарушенных почв. Разработанные биогеохимические технологии являются адаптивными к природно-климатическим условиям Крайнего Севера, ныне характеризующемуся усилением континентальности климата. Именно в таких условиях на территории Тазовского полуострова была апробирована *in vitro* и *in situ*, и в настоящее время успешно реализуется биогеохимическая технология рекультивации тундровых почв, нарушенных вследствие добычи и транспортировки природного газа. Подтверждением жизнеспособности предложенных для практики целого ряда биогеохимических технологий явилась их апробация *in vitro* и *in situ* на острове Белый (Карское море) при рекультивации нарушенных и погребенных каменным углем тундровых почв, а также при рекультивации пирогенных и загрязненных углеводородами почв, и нейтрализации углеводородных шламов в других условиях газодобычи. При этом рекультивация тундровых почв способствует предотвращению их растепления и повышает инженерную устойчивость инфраструктурных объектов.

Этой же цели следует и расчет величин геоэкологических рисков в условиях изменения климата. Полученные величины характеризуют вероятность смены природной растительности (мхи и лишайники заменяются злаками и осоками, что снижает термопротекторные свойства растительного покрова) в импактных зонах при избыточном выпадении соединений оксидов азота, имитируемых при работе газодобывающих предприятий и га-

зопроводов. В данных зонах также необходимо использование биогеохимических технологий для рекультивации экосистем.

В большинстве случаев эти инновационные, природоподобные технологии можно использовать для создания информационных тест-моделей при планировании широкомасштабных рекультивационных работ, особенно в районах Крайнего Севера. Такие технологии применимы также и в других почвенно-экологических и климатических условиях, в частности, в агроэкосистемах.

Автор выносит глубокую благодарность А.В. Синдиревой — научному редактору статьи.

Работа выполнена в рамках темы Миннауки РФ Биогеохимические процессы трансформации минерального и органического вещества почв на разных этапах эволюции биосферы и техносферы (0191-2021-0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдусаматов Х.И. (2014) Долговременный отрицательный среднегодовой энергетический баланс Земли приведет к Малому ледниковому периоду. *Солнечная и солнечно-земная физика — 2014. Труды Всероссийской ежегодной конференции с международным участием*. Санкт-Петербург, 3-6.
- Абдусаматов Х.И. (2017) Лунная обсерватория для исследований климата в эпоху глубокого похолодания. *Солнечная и солнечно-земная физика — 2017. Труды XXI Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца*. Санкт-Петербург, 3-6.
- Башкин В.Н. (2018) Инженерная биогеохимия и биогеохимические технологии. *Инноватика и экспертиза*. 23(2), 140-144.
- Башкин В.Н., Припутина И.В. (2010) *Управление экологическими рисками при эмиссии поллютантов*. М.: Газпром-ВНИИГАЗ, 189 с.
- Башкин В.Н., Арно А.Б., Арабский А.К., Барсуков П.А., Припутина И.В., Галиулин Р.В. (2012) *Ретроспектива и прогноз геоэкологической ситуации на газоконденсатных месторождениях Крайнего Севера*. М.: Газпром-ВНИИГАЗ, 280 с.
- Благодатская Е.В., Семенов М.В., Якушев А.В. (2016) Активность и биомасса почвенных микроорганизмов в изменяющихся условиях окружающей среды. М.: Товарищество научных изданий КМК, 243 с.
- Богданов В.Д., Головатин М.Г. (2017) Эколого-социально-экономический аспект эпизоотий северного оленя на Ямале (на примере сибирской язвы). *Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа*. 94(1), 4-10.
- Бобровицкая Н.Н. (2007) Современное состояние климата и последствия его изменения (на примере территории РФ и применительно к полуострову Ямал): техн. документ. СПб: ГУ “ГГИ”, 2007, 5 с.
- Вернадский В.И. (1939) Проблемы биогеохимии. М.; Л.: Изд-во АН СССР. Вып. 2. 34 с.
- Ермаков В.В., Карпова Е.А., Корж В.Д., Остроумов С.А. (2012) *Инновационные аспекты биогеохимии*. М.: ГЕОХИ РАН, 345 с.
- Захарова М.И. (2022) Оценка потенциального риска при истечении газа на надземных участках газопровода с учетом аномальных метеоусловий Севера. *Проблемы анализа риска*. 19(6), 62-69.
- Звягинцев Д.Г., Асеева И.В., Бабьева И.П., Мирчинк Т.Г. (1980) Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 15-20, 34-38.
- Маркелов В.А., Андреев О.П., Кобылкин Д.Н., Арабский А.К., Арно О.Б., Цыбульский П.Г., Башкин В.Н., Казак А.С., Галиулин Р.В. (2013) Устойчивое развитие газовой промышленности. М.: ООО “Издательский дом Недра”, 244 с.
- Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А., Дыну М.И. (2016) *Защита вод. Уязвимость и критические нагрузки*. М.: URSS, 393 с.
- Помазкина Л.В., Котова Л.Г., Лубнина Е.В. (1999) *Биогеохимический мониторинг и оценка режимов функционирования агроэкосистем на техногенно загрязняемых почвах*. Новосибирск: Наука, 207 с.
- 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. (2016) Вспышка сибирской язвы в Ямало-Ненецком автономном округе в 2016 году, эпидемиологические особенности. *Проблемы особо опасных инфекций*. (4), 42-46.
- Шестакова И.В. (2016) Сибирская язва ошибок не прощает: оценка информации после вспышки на Ямале летом 2016 года. *Журн. инфектологии*. 8(3), 5-27.
- Bashkin V. (2016) *Biogeochemical technologies for managing pollution in polar ecosystems*. *Environmental Pollution*, Vol. 26, Springer: Switzerland, 219 p.
- Bashkin V. (2017). Ecological and biogeochemical cycling in impacted polar ecosystems. NOVA Publishers, 308 p.
- Bashkin V.N. (2022) Biogeochemical Engineering: Technologies for Managing Environmental Risks. *Adv. Environ. Eng. Res.* 3(4), 040.
<https://doi.org/10.21926/aeer.2204040>
- Bashkin V.N., Galiulin R.V. (2019) Geoeological Risk Management in Polar Areas. *Environmental Pollution*, 28, Springer, Switzerland, 155 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-04441-1>
- Leith Y. (1975) Modelling the primary productivity of the World. (Eds H. Leith & R.H. Whittaker) *Priming productivity of the biosphere*. Ecological Studies 14, Springer-Verlag, NY, 19-75.