

УДК 631.4 + 631.95

<https://doi.org/10.32686/1812-5220-2023-20-2-68-85>

ISSN 1812-5220

© Проблемы анализа риска, 2023

Управление природными и экологическими рисками при усилении континентальности климата

Башкин В. Н.*,**Припутина И. В.,**

Институт физио-химических и биологических проблем почвоведения, ФИЦ ПНЦБИ РАН

Галиулина Р. А.,

Институт фундаментальных проблем биологии, 142290, Россия, Московская обл., г. Пущино, Институтская ул., д. 2

Аннотация

В статье рассмотрены приемы управления природными и экологическими рисками в условиях усиления континентальности климата в полярных регионах газодобычи. Показано, что природные риски, связанные с ростом летних температур, могут проявляться в виде различных эпизоотий. Ведущим фактором проявления таких природных рисков являются широкомасштабные нарушения тундровых почв, в частности, на полуострове Ямал вследствие перевыпаса оленей. Экологические риски в данном регионе связаны с влиянием предприятий ТЭК на процессы эвтрофирования тундровых экосистем, что проявляется в виде смены видового состава растительных сообществ и усиления растепления почвогрунтов. На фоне наблюдаемого в последние годы усиления континентальности климата на территории Тазовского полуострова успешно апробированы адаптивные к климатическим условиям Крайнего Севера биогеохимические технологии рекультивации тундровых почв, основу которой составляют специально разработанные методики, защищенные патентами Российской Федерации.

Ключевые слова: природные риски; экологические риски; континентальность климата; биогеохимические технологии; рекультивация экосистем.

Для цитирования: Башкин В. Н., Припутина И. В., Галиулина Р. А. Управление природными и экологическими рисками при усилении континентальности климата // Проблемы анализа риска. 2023. Т. 20. № 2. С. 68—85, <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2023-20-2-68-85>

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Management of Natural and Environmental Risks in the Context of Increasing Continentality of the Climate

Vladimir N. Bashkin*,

Irina V. Priputina,

Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences

Rosa A. Galiulina,

Institute for Fundamental Problems of Biology, Russian Academy of Sciences, Institute str., 2, Pushchino, Moscow region, 142290, Russia

Abstract

The article presents methods for managing natural and environmental risks in the conditions of increasing continentality of the climate in the Polar regions of gas production. It is shown that natural risks associated with the rise in summer temperatures can manifest themselves in the form of various epizootics. The leading factor in the manifestation of such natural risks are large-scale disturbances of tundra soils, in particular, on the Yamal Peninsula due to overgrazing of reindeer. Environmental risks are associated with the impact of gas industry on the processes of eutrophication of tundra ecosystems, which manifests itself in the form of a change in the predominant forms of vegetation and increased thawing of soils. Against the backdrop of an increase in the continentality of the climate, in recent years, on the territory of the Taz Peninsula, biogeochemical technologies for the reclamation of tundra soils, adaptive to the climatic conditions of the Far North, have been successfully tested, based on methods protected by patents of the Russian Federation.

Keywords: natural risks; environmental risks; climate continentality; biogeochemical technologies; ecosystem reclamation.

For citation: Bashkin V. N., Priputina I. V., Galiulina R. A. Management of natural and environmental risks in the context of increasing continentality of the climate // *Issues of Risk Analysis*. 2023;20(2):68-85, (In Russ.), <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2023-20-2-68-85>

The authors declare no conflict of interest.

Содержание

Введение

1. Феномен усиления континентальности климата
2. Природные риски усиления континентальности климата в ЯНАО и пути их решения
3. Оценка экологических рисков в зоне воздействия эмиссии NO_x от Бованенковского газоконденсатного месторождения
4. Управление природными и экологическими рисками с использованием инновационных биогеохимических технологий

Заключение

Литература

Введение

Глобальная температура поверхности в земной системе повышалась в течение последнего столетия. Среднее потепление в 1880—2012 гг. составило 0,85 К (с диапазоном неопределенности от 0,65 до 1,06 К), а в 1951—2012 гг. — до 0,72 К (с диапазоном неопределенности от 0,49 до 0,89 К) [1]. В соответствии с общепринятыми представлениями, основной причиной потепления является антропогенный парниковый эффект, сопровождающийся, а иногда и компенсируемый другими антропогенными и природными воздействиями и внутренней изменчивостью климатической системы [2].

Однако в настоящее время рост глобальной температуры существенно замедлился. На рис. 1 показано, что глобальная температура была практически постоянной в течение 8 лет и 4 месяцев, изменяясь в пределах 0,2 °C от уровня 1991 г., взятого за стандарт. Это может быть связано с ослаблением Североатлантического колебания (NOA — North Atlantic Oscillations), охлаждением Северной Атлантики и связанным с этим глобальным изменением температуры, таким как в период с 1950 по 1970 г. [3].

Кроме того, в 2022 г. практически не было отклонений в выпадениях осадков от усредненных многолетних значений (рис. 2), а также не отмечено роста стихийных бедствий [4].

Существует несколько альтернативных гипотез о природе наблюдаемого изменения климата. В отличие от очень политизированной алармистской позиции, поддерживаемой во многих СМИ, по мнению целого ряда исследователей, основной вклад в его формирование вносят природные (неантропогенные) факторы [5—12]. Одним из широко используемых аргументов в поддержку этих гипотез является временной лаг между изменениями глобальной температуры (T) и содержанием углекислого газа $q\text{CO}_2$ в атмосфере, полученный из кернов антарктического льда: согласно этим данным, изменения $q\text{CO}_2$ отстают от изменений T на несколько столетий [13—14]. Кроме того, было показано, что межгодовые изменения $q\text{CO}_2$ также отстают от соответствующих изменений T для инструментальных данных за последние десятилетия. Поскольку ожидается, что эффект не может привести к его причине, такие задержки используются в качестве

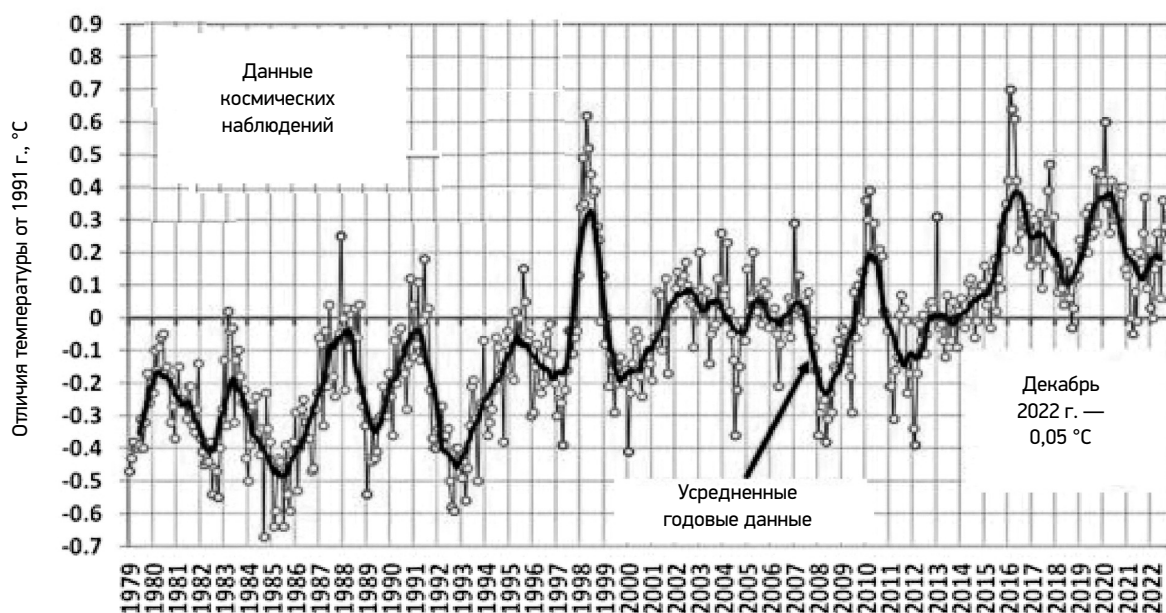


Рис. 1. Изменения глобальной температуры, основанные на данных системы космических наблюдений UAH 6.0 (на основании данных University of Alabama in Huntsville, USA <https://www.researchgate.net/institution/University-of-Alabama-in-Huntsville>)

Figure 1. Global temperature changes based on space observation system UAH 6.0 (based on data from the University of Alabama in Huntsville, USA <https://www.researchgate.net/institution/University-of-Alabama-in-Huntsville>)



Рис. 2. Изменения глобальных усредненных выпадений (на основании данных [4])

Figure 2. Changes in global average drops (based on data [4])

аргумента для опровержения основной роли антропогенного парникового эффекта в изменении климата (например, [15, 16]).

Увеличение уровня CO_2 в атмосфере может быть следствием потепления, а не его причиной. Проведенный статистический анализ показал, что, хотя и существует корреляция между $q\text{CO}_2$ и глобальной температурой, изменения в $q\text{CO}_2$ появляются после изменений температуры с лагом примерно 5 мес. [16]. Возможным объяснением может быть факт глобальных изменений температуры вследствие естественных причин и соответствующее возрастание температуры океанических вод, где содержится более 90% общей массы CO_2 . Это, в свою очередь, ведет к увеличению потока CO_2 из воды в атмосферу в соответствии с законом Генри. Хотя эти аргументы подвергались критике на разных основаниях [17], но запаздывание между изменениями климатических переменных как надежный показатель причинно-следственных связей в системе Земли не было подвергнуто сомнению большинством критиков.

В статьях [18, 19] описывается возможный механизм взаимного запаздывания между изменениями глобальной температуры поверхности Земли и содержанием CO_2 в атмосфере $q\text{CO}_2$. Этот механизм может сработать, когда климатическая система Земли подвергается воздействию однофазных выбросов углекислого газа и метана. При этом в исследованиях [20] предполагается, среди природных причин глобального потепления, выделение такого факто-

ра, как триггерная активация выбросов метана под воздействием сейсмической активности. В Арктике триггерная активация выбросов метана началась в конце 1970-х гг. прошлого века, когда тектонические волны, вызванные крупными землетрясениями на Алеутской дуге в 1957—1965 гг., достигли Арктического шельфа, пройдя расстояние около 2000 км со скоростью около 100 км/год в течение примерно 20 лет. Этот процесс был связан с резким потеплением окружающей среды в Арктике в 1979—1980 гг. из-за парникового эффекта от выбросов метана.

В то же время показано [21], что наблюдается значительное уменьшение площади возможного существования мерзлого грунта и гидратов метана в послеледниковый период. Основываясь на обширном анализе зон деградации подводного мерзлого грунта на шельфах морей Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского и Бофорта ($\approx 57\%$ от общей площади), можно сделать вывод, что существует относительно низкая вероятность значительного вклада метана, выделяющегося из диссоциирующих газовых гидратов, в изменение климата.

Наряду с этим в последние десятилетия многие авторы отмечают феномен усиления континентальности климата [22], что сопровождается усилением (повышением) природных и экологических рисков. В этой связи целью данной работы было рассмотрение вопросов управления природными и экологическими рисками в условиях усиления континентальности климата в полярных регионах газодобычи.

1. Феномен усиления континентальности климата

Как известно, континентальный климат характеризуется стабильно жарким летом и морозной зимой с малым количеством осадков. При этом усиление континентальности климата или повышение индекса этого феномена свидетельствует о грядущем глобальном похолодании, которое может происходить как за счет уменьшения потока солнечной радиации, поступающей на Землю, так и за счет сокращения потока тепла из океана в атмосферу [23—27]. Что касается континентального климата полярных широт, то для него характерны большие годовые колебания температуры воздуха и теплое, но короткое лето, а также очень студеной и длительная зима.

При этом стоит, хотя бы в качестве дискуссионного обсуждения, остановиться на рассмотрении следующих заключений. Так, усиление континентальности климата может свидетельствовать о наступлении очередного глобального похолодания, что выражается в изменении климата Земли в целом или отдельных ее регионов с течением времени и отмечается в статистически достоверных отклонениях параметров погоды от их многолетних значений за период времени от десятилетий до миллионов лет. Рядом авторов [28—33] было установлено, что изменение климата, в частности, в эпоху четвертичного периода — голоцена, которая продолжается последние 11 тыс. лет вплоть до современности, характеризуется сочетаниями периодов похолодания и потепления в различные интервалы времени, что свидетельствует о циклическом характере изменения этого феномена на Земле.

Несмотря на отмеченные выше флуктуации температуры и влажности, в относительно близком будущем Земля может оказаться на пороге повторения такого же Малого ледникового периода, который имел место в Северном полушарии в XVII—XVIII вв. Возможность похолодания связана с резким снижением мощности излучения Солнца как единственного источника энергии для Земли и, следовательно, основного фактора изменения ее климата. Отмечены две физические причины для изменения инсоляции (облучения поверхности Земли солнечным светом) на верхнем слое атмосферы

— это долгопериодические вариации элементов орбиты Земли и короткопериодические вариации солнечной постоянной, т. е. суммарной мощности солнечного излучения, составляющей 1367 Вт/м^2 [29, 30, 33]. При этом изменения солнечной постоянной измерялись эмпирически только за эпоху наблюдений космическими аппаратами, а на промежутке вплоть до 11 тыс. лет назад (начало голоцена) восстанавливались по содержанию радиоуглерода (изотоп ^{14}C) в кольцах деревьев. Х. И. Абдусаматов показал взаимосвязь циклов солнечной активности с масштабными изменениями климата на Земле. Им приведены факты связи солнечной активности с изменениями климата: когда наблюдается глубокий минимум солнечной активности, происходит похолодание. Можно ожидать, что наступление фазы глубокого минимума в нынешней квазидвухвековой циклической деятельности Солнца произойдет в начале $27(\pm 1)$ -го 11-летнего солнечного цикла, ориентировочно в 2043 ± 11 г. Это послужит причиной эпохи нового 19-го Малого ледникового периода за последние 7500 лет [29]. Хотя Земля уже в настоящее время стала получать меньше солнечной энергии, но еще не успела соответственно остыть благодаря термической инерции Мирового океана. Следовательно, она отдает и далее будет отдавать больше энергии путем излучения в космос, чем получает ее в течение всей фазы спада квазидвухвекового цикла [34]. В результате такого длительного дефицита поступающей солнечной энергии среднегодовой энергетический бюджет Земли как планеты и далее будет отрицательным, что и может привести к началу остывания планеты.

В настоящее время усиление континентальности климата уже отмечается в ряде регионов. Многими учеными это рассматривается как признак наступления очередного этапа похолодания. Так, в начале XXI в. (2001—2006 гг.) на всех метеостанциях в Тувинской горной области ($50\text{—}54^\circ$ с.ш., $89\text{—}99^\circ$ в.д.) наметилась тенденция к повышению индекса континентальности климата [23]. Как уже было отмечено, в начале XXI в. началось изменение характера Североатлантической осцилляции и сопряженных с ней региональных климатических систем к очередному относительно холодному сценарию, который предположительно будет продолжаться до 2030—2035 гг.

Это подчеркивает тенденцию перехода данных систем к новой фазе, по ряду характеристик подобной сценарию 1940—1970-х гг. (холодная фаза). В то время наблюдалось усиление континентальности климата на материках [24]. Результаты анализа пространственно-временных изменений температурно-ветрового режима по Северному полушарию в зоне умеренных широт (30—70° с.ш.) за период 1948—2013 гг. показали, что с начала XXI в. зимние температуры стали понижаться, а летние, начиная с 1975 г., наоборот, возрастать в широтной зоне 50—70° с.ш., что также свидетельствует об усилении континентальности климата [25]. Аналогичная картина отмечена для Центральной Азии и Татарстана, где с начала XXI в. отмечается усиление континентальности климата, когда в результате похолодания зим и повышения летних температур годовая амплитуда колебания температуры воздуха увеличилась [26, 27].

Проведенная оценка изменения индекса континентальности климата и его составляющих на территории Приднестровья за период 1952–2018 гг. выявила рост индекса континентальности и всех его составляющих и в этом регионе [35]. За последние 30 лет (1988–2018 гг.) наблюдался статистически значимый рост индекса континентальности (на 0,47% в год) и всех его составляющих: годовой амплитуды температуры воздуха (на 0,10 °C/год), среднегодовой суточной амплитуды температуры воздуха (на 0,03 °C/год), среднегодового дефицита влажности воздуха (на 0,06 мбар/год). Рост континентальности климата происходил на фоне роста среднегодовой температуры воздуха (на 0,04 °C/год). Колебания показателей континентальности климата происходили независимо друг от друга, иногда даже в противофазе. Характер кривой колебаний фактических значений индекса континентальности определялся главным образом значениями годовой амплитуды температуры воздуха.

В последнее десятилетие происходит изменение интенсивности и распространения Сибирского антициклона, а он играет ключевую роль в формировании атмосферных процессов над азиатской частью материка, оказывая влияние на общую циркуляцию атмосферы в Северном полушарии. Следует отметить: прогнозная модель Межправ-

ительственной группы экспертов по изменению климата предполагала, что вариации интенсивности Сибирского антициклона будут демонстрировать устойчивую тенденцию к снижению с конца XX в. и на протяжении всего XXI в., что приведет к снижению его интенсивности примерно на 22% к 2100 г. по сравнению со средним показателем интервала 1958—1980 гг. Однако в реальности, в последние два десятилетия, наблюдается резкий рост интенсивности Сибирского антициклона (<https://ieig.sfu-kras.ru/node/119>, Институт экологии и географии СФУ). Это отражается на усилении континентальности климата в северных регионах [36, 37].

Наблюдения показывают, что усиления континентальности климата в полярных широтах и, в частности, на территории Ямало-Ненецкого автономного округа, имели определенные геоэкологические последствия на полуострове Ямал (71° с.ш., 70° в.д.) и выразились в проявлении природных и экологических рисков.

2. Природные риски усиления континентальности климата в ЯНАО и пути их решения

Усиление континентальности климата проявилось, в частности, в 2016 г. в виде аномальной жары (29—34 °C в июне-июле), что вызвало на полуострове Ямал вспышку эпидемии сибирской язвы, возбудителем которой является бактерия *Bacillus anthracis* [38, 39]. В результате эпидемии заболело 2650 северных оленей и, как следствие контакта с больными и павшими животными, было инфицировано 36 человек с одним летальным исходом. Негативное воздействие аномальной жары на иммунную систему оленей на фоне прекращения вакцинации, а также увеличение численности кровососущих насекомых, очевидно, стали причиной массового заболевания сибирской язвой северных оленей.

Как известно, сибирская язва является особо опасной бактериальной зоонозной инфекцией, т. е. инфекцией, передающейся от животных к человеку и способной, благодаря длительному нахождению в почве спор *Bacillus anthracis*, сохранять угрозу возвращения и повторных вспышек на пораженных территориях в течение многих десятилетий. Основным источником инфекции для человека

является больное животное или его труп. Факторами передачи служат продукты животноводства, почва и другие объекты окружающей среды. Распространение инфекции происходит как алиментарным путем, когда споры с выделениями больных животных или через трупы попадают на почву и растительность, а оттуда к здоровым животным, так и трансмиссивным путем, т. е. с участием кровососущих насекомых — слепней (*Tabanidae*), мух-жигалок (*Muscidae*) и мошек (*Diptera*) [40]. Кроме того, во время пастбы, особенно на скудной растительности тундры, споры с частичками почвы попадают в кишечник или легкие животного.

Почва является местом наиболее длительного пребывания *Bacillus anthracis*, где они пассивно сохраняются в виде спор десятки и сотни лет, дожидаясь благоприятного для размножения времени, т. е. почва является постоянным резервуаром возбудителя болезни. Отмеченная температурная аномалия на полуострове Ямал способствовала увеличению глубины сезонного протаивания многолетней мерзлоты и перемещению спор *Bacillus anthracis* из глубинных слоев к поверхности почвы с межмерзлотными водами. При этом первичные почвенные очаги данной бактерии образуются в результате непосредственного инфицирования почвы выделениями больных животных на пастбищах, в местах стойлового содержания животных и захоронения трупов оленей (скотомогильники), а вторичные очаги создаются путем смыва или заноса спор на новые территории дождевыми, тальными и сточными водами.

В таких ситуациях непременно должна работать санитарно-эпидемиологическая служба со своими лабораториями для выявления очагов и купирования возникающих проблем. Однако, учитывая то, что территория ЯНАО превышает размер большинства европейских стран, на этой территории крайне низкая численность постоянно проживающего населения (значительная часть которого ведет кочевой образ жизни) и слабо развитая инфраструктура, такая задача становится просто физически невыполнимой. А решать эту проблему, безусловно, требуется, несмотря на низкое число специализированных и сертифицированных санитарно-эпидемиологических лабораторий. Один из вариантов решения проблемы — разработать технологии-

индикаторы, позволяющие стандартным экологическим лабораториям, имеющимся в штатном расписании газодобывающих предприятий, производить индикаторную оценку эпидемиологического состояния на подконтрольной территории лицензионных участков и по договорам с местной администрацией на подконтрольных ей территориях. Индикаторная оценка необходима для того, чтобы вызывать специалистов санитарно-эпидемиологической службы только в случае возникновения такой необходимости, рационализируя ее функционирование на территории ЯНАО и других регионов Крайнего Севера.

Поставленную таким образом задачу удалось решить на основе разработанной инновационной технологии оперативной оценки микробного загрязнения природных вод, защищенной патентом на изобретение РФ [41]. 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 усредненный 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.

При этом значения активности фермента дегидрогеназы были подтверждены результатами анализа количества микробов, продуцирующих данный фермент в различных пробах, проведенного по общепринятой методике [42]. 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 в прямо пропорциональной зависимости от количества микробов, т. е. чем

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

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

№ пробы	Соотношение навоз : вода	Активность фермента дегидрогеназы, мкг $C_{19}H_{16}N_4/(г\cdotсут)$ [проба № 1] и мкг $C_{19}H_{16}N_4/(мл\cdotсут)$ [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	$1,0\cdot 10^6$

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.

Предложенный метод позволяет оперативно (в течение 1 суток):

- идентифицировать микробное загрязнение водной среды из навоза скота, происходящее в результате просачивания через навоз дождевых и 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 [43], 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.

Как следует из сказанного, усиление континентальности климата в Ямало-Ненецком автономном округе и, в частности, на полуострове Ямал проявляется в виде таких геоэкологических последствий, как вспышки эпидемии сибирской язвы. Тем не менее в округе развивается оленеводство, идет добыча и транспортировка природного газа, создается современная инфраструктура. Эти виды антропогенной деятельности приводят, в свою очередь, к не менее серьезным геоэкологическим последствиям, проявляющимся в нарушении тундровых почв.

3. Оценка экологических рисков в зоне воздействия эмиссии NO_x от Бованенковского газоконденсатного месторождения

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 экологических рисков для экосистем в зоне воздействия эмиссионных выбросов БГКМ выполнена согласно стандартному алгоритму [44].

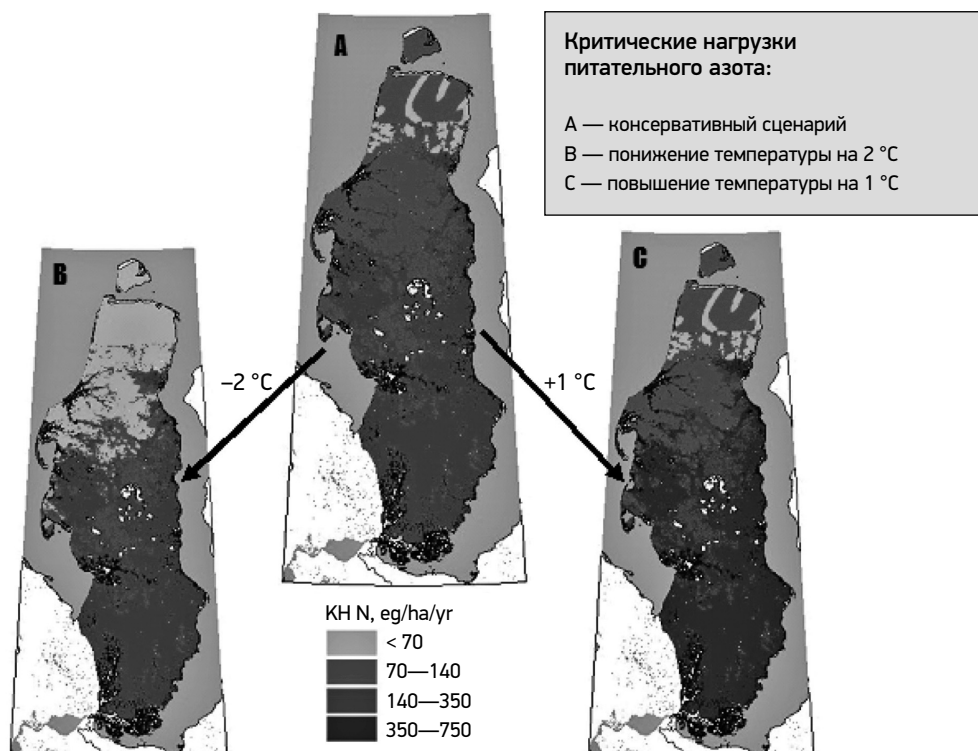


Рис. 3. Величины КН подкисляющих соединений для экосистем полуострова Ямал

Figure 3. CL values of acidifying compounds for ecosystems of the Yamal Peninsula

3.1. 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 счет выветривания почвенных минералов (рис. 3).

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 су-

ровых 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. 4).

Изменение параметров масс-баланса азота в связи с усилением континентальности климата. Для экосистем полуострова Ямал экологические последствия похолодания и потепления климата будут связаны с изменениями не только средней годовой температуры воздуха и почвенных толщ, но и комплекса зависящих от температурных условий параметров масс-баланса азота и макроэлементов. Повышение-снижение температуры скажется на интенсивности следующих ландшафтно-биогеохимических процессов:

- продуктивности фитоценозов и закреплении азота и катионов в биомассе;

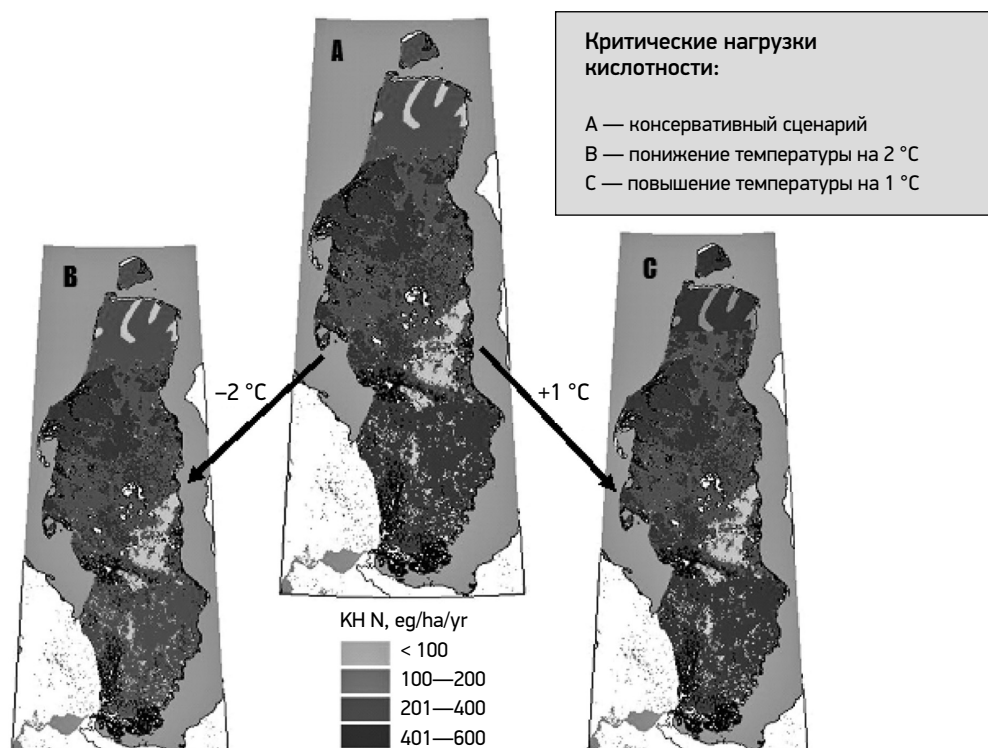


Рис. 4. Величины КН эвтрофирующих соединений для экосистем полуострова Ямал

Figure 4. Eutrophying compound CL values for Yamal Peninsula ecosystems

- 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 предложенным для анализа 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 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 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. Литы [45] 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 $N_{im} < N_{урт}$. С учетом снижения продуктивности экосистем 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 [46], 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/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 био-

геоценоза. 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

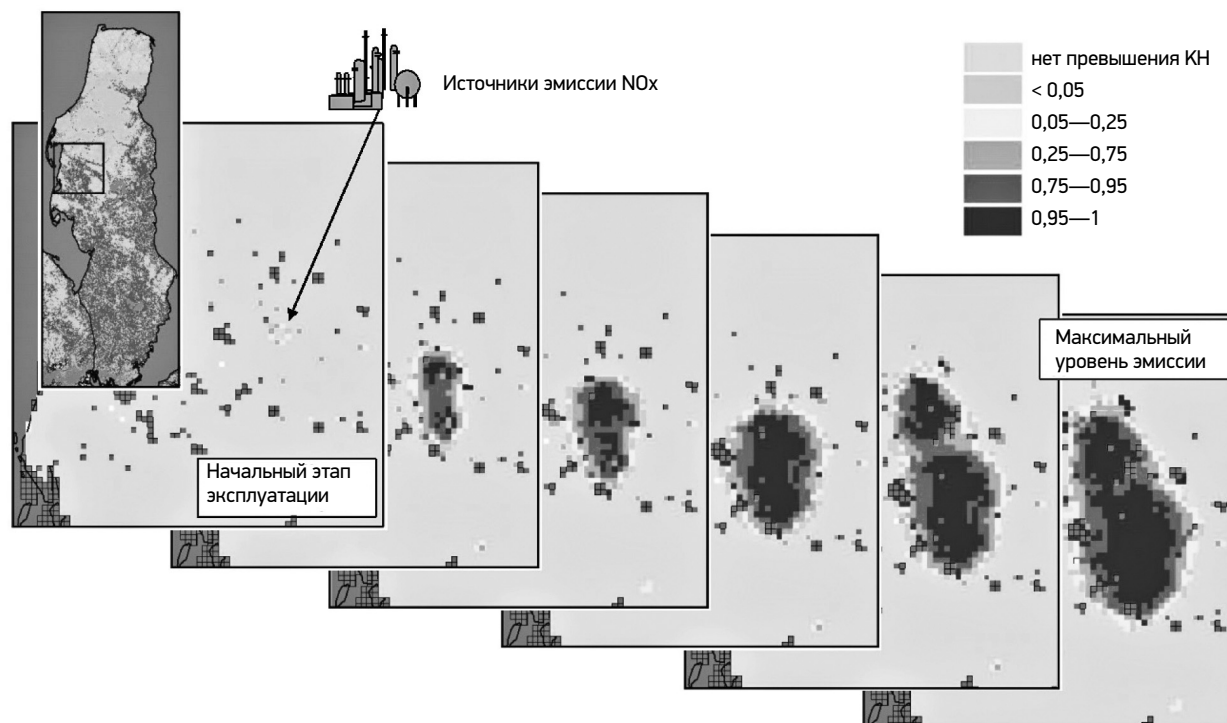


Рис. 5. Результаты расчетов рисков эвтрофирования для экосистем в зоне воздействия БГКМ при поэтапном вводе технологических установок, %

Figure 5. Results of calculations of eutrophication risks for ecosystems in the impact zone of BGCF during phased commissioning of process units, %

южных экосистем, представленных вариантами наиболее продуктивных в этой зоне травянисто-кустарничково-моховых тундр. Для них рассчитанные величины KN питательного азота возрастут с 140—350 до 400—700 экв./га в год. Таким образом, допустимое поступление азота составит 5—10 кг N.

3.2. Характеристика рисков

Результаты оценки вероятности экологических рисков для наземных экосистем в отношении эффектов эвтрофирования показаны на рис. 5. На всех этапах большая часть рассматриваемой территории характеризуется отсутствием превышений $KN(N)_{nut}$, рассчитанных для наиболее чувствительных к азотному загрязнению олиготрофных видов — лишайников и мхов. Высокие риски эвтро-

фирования прогнозируются для экосистем вблизи БГКМ после ввода в эксплуатацию дожимных компрессорных станций.

При максимальном уровне выбросов превышение $KN(N)_{nut}$ 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 будут увеличение численности осок и злаковых видов и повышение общей продуктивности фитоценозов, что может привести к изменению термических характеристик почвенно-растительного слоя. Другим экологиче-

ским эффектом может быть увеличение кислотности почвенно-грунтовых и поверхностных вод. 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.

4. Управление природными и экологическими рисками с использованием инновационных биогеохимических технологий

Инновационные биогеохимические технологии рекультивации нарушенных и загрязненных почв [47—50] 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 объем природного газа России и широко распространено традиционное пастбищное оленеводство, повышают уровень рисков отрицательного влияния этих факторов на газопромышленные 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 экологическими рисками возможно различными методами, в том числе за счет технологий рекультивации нарушенных и загрязненных почв.

Как известно, почва является средой обитания определенного сообщества микроорганизмов, семян растений и самих растений, представляя собой сложную систему, многие параметры которой сложно 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 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.

Заключение

На сегодняшний день очевиден факт усиления континентальности климата, проявляемый в температурных аномалиях. Следствием этого является возрастание природных и 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 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, защищенные 8 патентами Российской Федерации на изобретения.

Литература [References]

- Hartmann D., Klein T.A., Rusticucci M., Alexander L., Brönnimann S., Charabi Y., Dentener F., Dlugokencky E., Easterling D., Kaplan A., Soden B., Thorne P., Wild M. and Zhai P. Observations: atmosphere and surface Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ed T Stocker et al. New York: Cambridge University Press. 2013. P. 659—740.
- Bindoff N., Stott P., AchutaRao K., Allen M., Gillett N., Gutzler D., Hansingo K., Hegerl G., Hu Y., Jain S., Mokhov I., Overland J., Perlwitz J., Sebbari R., Zhang X. Detection and attribution of climate change: from global to regional Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ed T Stocker et al. New York: Cambridge University Press. 2013. P. 867—952.
- Omrani N.E., Keenlyside N., Matthes K. et al. Coupled stratosphere-troposphere-Atlantic multidecadal oscillation and its importance for near-future climate projection // *Clim Atmos Sci*. 2022. V. 5 (59). <https://doi.org/10.1038/s41612-022-00275-1>
- Van Dijk A. I. J. M., Beck H. E., de Jeu R. A. M., Dorigo W. A., Hou J., Preimesberger W., Rahman J., Rozas Larraondo P. R., van der Schalie R. Global Water Monitor 2022, Summary Report. 2022. Global Water Monitor (www.globalwater-monitor.online).
- Soon W. H., Posmentier E. S., Baliunas S. L. Inference of Solar Irradiance Variability from Terrestrial Temperature Changes, 1880–1993: An Astrophysical Application of the Sun-Climate Connection // *The Astrophysical Journal*, 1996. V. 472(2), 891—902. <https://doi.org/10.1086/178119>
- Cioccale M. A. Climatic fluctuation in the Central region of Argentina in the last 1000 years // *Quaternary International*, 1999. V. 62, 35—47.
- Dahl-Jensen D. Past temperatures directly from the Greenland icesheet // *Science*, 1998. V. 282, 268—271.
- Dean W. E., Schwalb A. Holocene environmental and climatic change in the Northern Great Plains as recorded in the geochemistry of sediments in Pickers Lake, South Dakota. *Quaternary International*, 2000. V. 67, 5—20.
- Grove J. M., Switsur R. Glacial geological evidence for the medieval warm period // *Climatic Change*, 1994. V. 26, 143—169.
- Hong Y. T. Response of climate to solar forcing recorded in a 6000-year time-series of Chinese peat cellulose // *The Holocene*, 2000. V. 10, 1—7.
- Huang S., Pollack H. N., Shen P. Y. Late quaternary temperature changes seen in world-wide continental heat flow measurements // *Geophysical Research Letters*, 1997. V. 24, 1947—1950.
- Forecasting Climate Change: CMIP 5 general circulation models versus a semi-empirical model based on natural oscillations // Published 2016 *Environmental Science*. DOI:10.18280/ijht.34sp0235
- Bezverkhny V. A. Correlation between 41 000-Year Rhythms in Variations in the Inclination of Earth, Violent Volcanic Eruptions, and Temperature of Deep Ocean Waters // *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*. December 2014. V. 50(6). 657—659. DOI: 10.1134/S0001433814040124
- Scholar O., Humlum K., Stordahl F., Solheim J. E. The phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2012. V. 109 (25), 9755—9760.
- Quinn J. Global Warming. Geophysical Counterpoints to the Enhanced Greenhouse Theory. Pittsburgh: Dorrance Publ. 2010. P. 118.
- Kuo C., Lindberg G., Nyjvpsen D. J. Coherence established between atmosphere carbon dioxide and global temperature // *Nature*, 1990, V. 343, 709—713.
- Richardson M., Cowtan K., Millar R. J. Global temperature definition affects achievement of long-term climate goals // *Environmental Research Letters*, 2018. V. 13 (5), 054004. DOI 10.1088/1748-9326/aab305
- Muryshv K. E., Eliseev A. V., Denisov S. N., Mokhov I. I., Arzhanov M. M., Timazhev A. V. Time lag between changes in global temperature and atmospheric CO₂ content under anthropogenic emissions of CO₂ and CH₄ into the atmosphere. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*. 2019. V. 231: 012039. doi:10.1088/1755-1315/231/1/012039
- Muryshv K. E., Eliseev A., Mokhov I., Arzhanov M. M., Timazhev A., Denisov S. Time lag between changes in global temperature and atmospheric CO₂ content according to the results of numerical experiments with Earth system models // *Environmental Science. Atmospheric and Ocean Optics*. December 2019. DOI:10.1117/12.2540793
- Lobkovsky L. I., Baranov A. A., Ramazanov M. M., Vladimirova I. S., Gabsatov Y. V., Semiletov I. P., Alekseev D. A. Trigger mechanisms of gas hydrate decomposition,

- methane emissions, and glacier breakups in Polar regions as a result of tectonic wave deformation. *Geosciences*. 2022. V. 12(10):372.
<https://doi.org/10.3390/geosciences12100372>
21. Bogoyavlensky I. A., Kishankov A., Kazanin A. Evidence of large-scale absence of frozen ground and gas hydrates in the northern part of the East Siberian Arctic shelf (Laptev and East Siberian seas). *Marine and Petroleum Geology*, 2023. V. 148, February 2023, 106050.
DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2022.106050
22. Башкин В. Н., Галиулин Р. В., Арабский А. К. Усиление континентальности климата и адаптивная рекультивация нарушенных тундровых почв // *Деловой журнал NEFTEGAZ.RU*. 2017. № 12(72). С. 92—97 [Bashkin V. N., Galiulin R. V., Arabskiy A. K. Strengthening of climate continentality and adaptive recultivation of disturbed tundra soils // *Neftegaz.RU*. 2017;(12):92-97, (In Russ.)]
23. Андрейчик М. Ф., Монгуш М. М. Особенности распределения индекса континентальности в Тувинской горной области // *Вестник Тывинского государственного университета*. 2009. № 2. С. 50—53 [Andreychik M. F., Mongush M. M. Features of the distribution of the continentality index in the Tuva mountain region // *Bulletin of Tyva State University*. 2009;(2):50-53, (In Russ.)]
24. Анисимов М. В., Бышев В. И., Залесный В. Б., Мошонкин С. Н., Нейман В. Г., Романов Ю. А., Серых И. В. О междекадной изменчивости климатических характеристик океана и атмосферы в регионе Северной Атлантики // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 2. С. 304—311 [Anisimov M. V., Byshev V. I., Zalesny V. B., Moshonkin S. N., Neiman V. G., Romanov Yu. A., Serykh I. V. On inter-decadal climate oscillations in the North-Atlantic region // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2012;9(2):304-311, (In Russ.)]
25. Переведенцев Ю. П., Шанталинский К. М. Мониторинг изменений температуры воздуха и скорости ветра в атмосфере Северного полушария за последние десятилетия // *Российский журнал прикладной экологии*. 2015. № 2(2). С. 3—8 [Perevedentsev Yu. P., Shantalinsky K. M. Monitoring of air temperature changes and wind velocity in the atmosphere of the Northern hemisphere during last decades // *Russian Journal of Applied Ecology*. 2015;(2.):3-8, (In Russ.)]
26. Каримов К. А., Крымская Д. Н. Особенности термодинамического режима нижней атмосферы в Центральноазиатском регионе под влиянием центров действия в Северной Атлантике // *Международный научный журнал «Инновационная наука»*. 2016. № 1—3. С. 35—38 [Karimov K. A., Krymskaya D. N. Features of the thermodynamic regime of the lower atmosphere in the Central Asian region under the influence of action centers in the North Atlantic // *International scientific journal "Innovative Science"*. 2016;(1-3):35-38, (In Russ.)]
27. Мустафина А. Б. Изменения основных климатических показателей на территории Республики Татарстан за период 1966—2013 гг. // *Географический вестник*. 2017. № 2 (41). С. 99—108,
doi: 10.17072/2079-7877-2017-2-99-108 [Mustafina A. B. Changes of the main climatic indicators in the territory of the Republic of Tatarstan during 1966–2013 // *Geographical bulletin*. 2017;(2(41)):99-108, (in Russ.),
doi: 10.17072/2079-7877-2017-2-99-108]
28. Dansgaard W., Johnsen S. J., Moller J., Longway C. C. Jr. One thousand centuries of climatic record from camp century on the Greenland ice sheet // *Science*. 1969. V. 166 (3903). P. 377—380.
29. Абдусаматов Х. И. Двухвековое снижение солнечной постоянной приводит к несбалансированному тепловому бюджету Земли и Малому ледниковому периоду // *Солнечная и солнечно-земная физика — 2011. Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца*. Санкт-Петербург, 2011. С. 295—298 [Abdusamatov H. I. Two-century decrease of the solar constant leads to an unbalanced thermal budget of the Earth and a small ice age // *Solar and solar-terrestrial physics — 2011. Proceedings of the All-Russian Annual Conference on Solar Physics*. Saint Petersburg, 2011. P. 295—298, (In Russ.)]
30. Абдусаматов Х. И. 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, 2014. С. 3—6 [Abdusamatov H. I. Long-term negative average annual energy balance of the Earth will lead to a small ice age // *Solar and solar-terrestrial physics — 2014. Proceedings of the All-Russian Annual Conference with International participation*. Saint Petersburg, 2014. pp. 3—6, (In Russ.)]
31. Башкин В., Галиулин Р. «Золотое время» природного газа в «Малом ледниковом периоде» // *Neftegaz.RU*. 2012. № 8. С. 38—43 [Bashkin V., Galiulin R. "Golden

- time” of natural gas in the “Little ice age” // *Neftegaz.RU*. 2012(8):38-43, (In Russ.)]
32. Bashkin V.N., Galiulin R. V. Climate cycling and modeling in polar areas // In: *Biogeochemical technologies for managing pollution in Polar ecosystems*. V. 26. Springer International Publishing, Switzerland. 2017. P. 95—105.
33. Archibald D. Climate outlook to 2030 // *Energy and Environment*. 2007. V. 18. No. 5. P. 615—619.
34. Абдусаматов Х.И. 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, 2017. С. 3—6 [Abdusamatov H.I. Lunar observatory for climate research in the era of deep cooling // *Solar and solar-terrestrial physics — 2017. Proceedings of the XXI All-Russian Annual Conference on Solar Physics*. Saint Petersburg, 2017. P. 3—6, (In Russ.)]
35. Кольвенко В.В., Капитальчук И.П., Долгов Ю.А., Ершов Л.А., Горобец А.В., Виеру А.С., Майборода В.О., Сизова А.В. Изменения континентальности климата на территории Приднестровья // *Биогеохимические инновации в условиях коррекции техногенеза биосферы*. Тирасполь. 2020. С. 173—181 [Kolvenko V.V., Kapitalchuk I.P., Dolgov Yu.A., Ershov L.A., Gorobets A.V., Vieru A.S., Mayboroda V.O., Sizova A.V. Changes in the continentality of climate on the territory of Pridnestrovie // *Biogeochemical innovations in the conditions of correction of technogenesis of the biosphere*. Tiraspol. 2020. P. 173—181, (In Russ.)]
36. Захарова М.И. Оценка потенциального риска при истечении газа на надземных участках газопровода с учетом аномальных метеоусловий Севера // *Проблемы анализа риска*. 2022. Т. 19. № 6. С. 100—107, <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-6-100-107> [Zakharova M.I. Assessment of potential risk during gas outflow at above-ground sections of the gas pipeline taking into account abnormal weather conditions of the North // *Issues of Risk Analysis*. 2022;19(6):100-107, (In Russ.), <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-6-100-107>]
37. Башкин В.Н. Экологические и климатические риски // *Проблемы анализа риска*. 2022. Т. 19. № 6. С. 8—9, <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-6-8-9> [Bashkin V.N. Ecological and climate risks // *Issues of Risk Analysis*. 2022;19(6):8-9, (In Russ.), <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-6-8-9>]
38. 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, <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2016-4-42-46> [Popova A.Yu., Demina Yu.V., Ezhlova E.B., Kulichenko A.N., Ryazanova A.G., Maleev V.V., Ploskireva A.A., Dyatlov I.A., Timofeev V.S., Nechepurenko L.A., Khar'kov V.V. Outbreak of Anthrax in the Yamalo-Nenets Autonomous District in 2016, Epidemiological Peculiarities // *Problems of Particularly Dangerous Infections*. 2016;(4):42-46, (In Russ.), <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2016-4-42-46>]
39. Шестакова И.В. Сибирская язва ошибок не прощает: оценка информации после вспышки на Ямале летом 2016 года // *Журнал инфектологии*. 2016. Т. 8. № 3. С. 5—27 [Shestakova I.V. Anthrax does not forgive mistakes: the information assessment following the Yamal Peninsula outbreak in the summer of 2016 // *Journal Infectologii*. 2016;8(3):5-27, (In Russ.)]
40. 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. № 1(94). С. 4—10 [Bogdanov V.D., Golovatin M.G. Ecological and socio-economic aspects of reindeer epizootics in the Yamal (on the example of anthrax) // *Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District*. 2017(1(94)):4-10, (In Russ.)]
41. Патент РФ на изобретение № 2735756. Способ идентификации микробного загрязнения водной среды посредством анализа активности фермента дегидрогеназы. Авторы: Арно О.Б., Арабский А.К., Башкин В.Н., Галиулин Р.В., Галиулина Р.А., Соловищук Л.А., Маклюк О.В., Мурзагулов В.Р., Линник А.И. Бюллетень патентов и изобретений // Опубликовано: 06.11.2020. Бюллетень № 31. Патентообладатель ООО «Газпром добыча Ямбург» [RF Patent for invention No. 2735756. A method for identifying microbial contamination of the aquatic environment by analyzing the activity of the enzyme dehydrogenase. Authors: Arno O.B., Arabsky A.K., Bashkin V.N., Galiulin R.V., Galiulina R.A., Solovishchuk L.A., Maklyuk O.V., Murzagulov V.R., Linnik A.I. Bulletin of patents and inventions // Published: 06.11.2020. Bulletin No. 31. The patent holder is Gazprom Dobycha Yamburg LLC, (In Russ.)]

42. 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 [Zvyagintsev D. G., Aseeva I. V., Babyeva I. P., Mirchink T. G. Methods of soil microbiology and biochemistry. Moscow: Publishing House of Moscow state univ. 1980. P. 15—20, P. 34—38, (In Russ.)]
43. Логинов В. Г., Игнатьева М. Н., Балашенко В. Г. Вред, причиненный ресурсам традиционного природопользования, и его экономическая оценка // Экономика региона. 2017. Т. 13. №. 2. С. 396—409, <https://doi.org/10.17059/2017-2-6> [Loginov V. G., Ignatieva M. N., Balashenko V. G. Harm to the resources of traditional nature management and its economic evaluation // Economy of Regions. 2017;13(2):396-409, (In Russ.), <https://doi.org/10.17059/2017-2-6>]
44. Башкин В. Н., Припутина И. В. Управление экологическими рисками при эмиссии поллютантов. М.: Газпром-ВНИИГАЗ. 2010. 189 с. [Bashkin V. N., Pripulina I. V. Environmental risk management in the emission of pollutants. Moscow: Gazprom-VNIIGAZ. 2010. 189 p., (In Russ.)]
45. Leith Y. Modelling the primary productivity of the World / Н. Leith & R. H. Whittaker (eds) // Priming productivity of the biosphere/ — Ecological Studies 14, Springer-Verlag, NY, 1975.
46. 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. [Bobrovitskaya N. N. The current state of the climate and the consequences of its change (on the example of the territory of the Russian Federation and in relation to the Yamal Peninsula): Tech. Document. — St. Petersburg: GU “GGI”, 2007, 5 p., (In Russ.)]
47. Патент РФ на изобретение № 2491137. Способ контроля эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв различного гранулометрического состава посредством анализа активности дегидрогеназы. Арно О. Б., Арабский А. К., Башкин В. Н., Галиулин Р. В., Галиулина Р. А., Маклюк О. В., Припутина И. В. Заявлено: 16.03.2012. Опубликовано: 27.08.2013. Бюллетень № 24 [RF patent for invention No. 2491137. A method for monitoring the effectiveness of recultivation of disturbed tundra soils of various granulometric composition by analyzing the activity of dehydrogenase. Arno O. B., Arabsky A. K., Bashkin V. N., Galiulin R. V., Galiulina R. A., Maltseva A. N., Yarnikov S. A., Nikolaev D. S., Murzagulov V. R. Announced: 16.03.2012. Published: 27.08.2013. Bulletin No. 24, (In Russ.)]
48. Патент РФ на изобретение № 2387996. Способ контроля очистки почв, загрязненных углеводородами, и нейтрализации углеводородных шламов посредством анализа активности дегидрогеназы. Башкин В. Н., Бухгалтер Э. Б., Галиулин Р. В., Коняев С. В., Калинина И. Е., Галиулина Р. А. Заявлено: 22.09.2008. Опубликовано: 27.04.2010. Бюллетень № 12 [RF Patent for invention No. 2387996. A method for monitoring the purification of soils contaminated with hydrocarbons and the neutralization of hydrocarbon sludge by analyzing the activity of dehydrogenase. Bashkin V. N., Accountant E. B., Galiulin R. V., Konyaev S. V., Kalinina I. E., Galiullina R. A. Announced: 22.09.2008. Published: 27.04.2010. Bulletin No. 12, (In Russ.)]
49. Патент РФ на изобретение № 2611159. Способ оценки эффективности рекультивации посредством торфа нарушенных тундровых почв с различной полной влагемкостью. Арно О. Б., Арабский А. К., Башкин В. Н., Галиулин Р. В., Галиулина Р. А., Алексеев А. О., Салбиев Т. Х.-М., Серебряков Е. П. Заявлено: 19.06.2015. Опубликовано: 21.02.2017. Бюллетень № 6 [RF Patent for invention No. 2611159. A method for evaluating the effectiveness of recultivation by peat of disturbed tundra soils with different total moisture capacity. Arno O. B., Arabsky A. K., Bashkin V. N., Galiulin R. V., Galiulina R. A., Alekseev A. O., Salbiev T. H.-M., Serebryakov E. P. Announced: 06/19/2015. Published: 21.02.2017. Bulletin No. 6, (In Russ.)]
50. Патент РФ на изобретение № 2610956. Способ получения гумата калия из местных торфов Ямало-Ненецкого автономного округа. Арно О. Б., Арабский А. К., Башкин В. Н., Галиулин Р. В., Алексеев А. О., Галиулина Р. А., Мальцева А. Н., Ямников С. А., Николаев Д. С., Мурзагулов В. Р. Заявлено: 09.11.2015. Опубликовано: 17.02.2017. Бюллетень № 5 [RF patent for invention No. 2610956. A method for obtaining potassium humate from local tariffs of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. Arno O. B., Arabsky A. K., Bashkin V. N., Galiulin R. V., Alekseev A. O., Galiulina R. A., Maltseva A. N., Yarnikov S. A., Nikolaev D. S., Murzagulov V. R. Announced: 09.11.2015. Published: 17.02.2017. Bulletin No. 5, (In Russ.)]

Сведения об авторах

Башкин Владимир Николаевич: доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (ИФХБПП РАН)

Количество публикаций: более 400

Область научных интересов: геоэкологические риски, газовая промышленность, биогеохимия

Researcher ID: J-4621-2018

Scopus Author ID: 7005340339

ORCID: 0000-0001-5656-3011

Контактная информация:

Адрес: 142292, Московская обл., г. Пущино, ул. Институтская, д. 2-2

vladimirbashkin@yandex.ru

Припутина Ирина Владимировна: кандидат географических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (ИФХБПП РАН)

Количество публикаций: более 100

Область научных интересов: моделирование экосистем, экологические риски, биогеохимия

ResearcherID: H-4200-2016

Scopus Author ID: 6508385090

ORCID: 0000-0002-3999-4191

Author ID: 68125

Контактная информация:

Адрес: 142292, Московская обл., г. Пущино, ул. Институтская, д. 2-2

irina.priputina@gmail.com

Галиулина Роза Адхамовна: научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт фундаментальных проблем биологии РАН (ИФПБ РАН)

Количество публикаций: более 80

Область научных интересов: геоэкологические риски, газовая промышленность, биогеохимия

Scopus Author ID: 6602432775

Контактная информация:

Адрес: 142292, Московская обл., г. Пущино, ул. Институтская, д. 2-1

rosa_g@rambler.ru

Статья поступила в редакцию: 10.01.2023

Одобрена после рецензирования: 25.01.2023

Принята к публикации: 20.02.2023

Дата публикации: 28.04.2023

The article was submitted: 10.01.2023

Approved after reviewing: 25.01.2023

Accepted for publication: 20.02.2023

Date of publication: 28.04.2023