

УДК 631.4:573.22:574.47:63.54
Научная специальность: 2.10.2

ISSN 1812-5220
© Проблемы анализа риска, 2024

Моделирование органического вещества для управления рисками эмиссии парниковых газов в экосистемах¹

Башкин В. Н.,

Институт физико-химических
и биологических проблем
почвоведения РАН,
142292, Россия,
Московская обл., г. Пушкино,
ул. Институтская, д. 2-1

Аннотация

Статья посвящена особенностям моделирования органического вещества. Углеродный и азотный почвенные циклы, которые формируются в результате сельскохозяйственного и природного использования, должны учитываться при моделировании, включая оценку выбросов парниковых газов в пахотных и целинных почвах. Рассматриваются математические, имитационные и физические модели. Рассмотрены подходы к количественной оценке компонентов биогеохимического углеродного цикла, включая двойную роль почвы как поглотителя и источника парниковых газов. Оценено взаимодействие углерод- и азот-минерализующей способности почв, показаны возможности оценки влияния на них климатических и антропогенных факторов. Предлагаются биогеохимические технологии и модели для управления экологическими рисками, связанными с выбросами парниковых газов.

Ключевые слова: агроэкосистемы; биогеохимические циклы; изменение климата; имитационное моделирование; органическое вещество почвы; парниковые газы; экологический риск; биогеохимические технологии.

Для цитирования: Башкин В.Н. Моделирование органического вещества для управления рисками эмиссии парниковых газов в экосистемах // Проблемы анализа риска. 2024. Т. 21. № 3. С. 10–23.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

¹ Статья подготовлена в рамках темы госзадания Миннауки РФ: Биогеохимические процессы трансформации минерального и органического вещества почв на разных этапах эволюции биосферы и техносферы (0191-2021-0004).

Modeling of Organic Matter to Manage the Risks of Greenhouse Gas Emissions in Ecosystems²

Vladimir N. Bashkin,

Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science RAS,
Institutskaya str., 2-1,
Pushchino, Moscow region,
142290, Russia

Abstract

The article is devoted to the features of the organic matter modelling. Carbon and nitrogen soil cycles, which are formed as a result of agricultural and natural use must be taken into account during mathematical simulation of arable and virgin soils. Mathematic, imitation and physical models are considered. Approaches to the quantitative assessment of the components of the biogeochemical carbon cycle, including the dual role of soil as a sink and a source of greenhouse gases, are considered. The interaction of the carbon- and nitrogen-mineralizing ability of soils is evaluated, and the possibility of assessing the influence of climatic and anthropogenic factors is shown. The biogeochemical technologies and models are suggested for managing the environmental risks related to GHG emissions.

Keywords: agroecosystems; biogeochemical cycles; climate change; simulation modeling; soil organic matter; greenhouse gases; carbon dioxide emissions; environmental risk; biogeochemical technologies.

For citation: Bashkin V.N. Modeling of organic matter to manage the risks of greenhouse gas emissions in ecosystems // *Issues of Risk Analysis*. 2024;21(3):10-23. (In Russ.).

The author declare no conflict of interest.

Содержание

Введение

1. Моделирование органического вещества и оценка эмиссии ПГ в агроэкосистемах
2. Моделирование органического вещества и оценка эмиссии ПГ в лесных экосистемах
3. Биогеохимические технологии для управления рисками эмиссии ПГ

Заключение

Список источников

² The article was prepared within the framework of the topic of the Ministry of Science of the Russian Federation: Biogeochemical processes of transformation of mineral and organic soil matter at different stages of the evolution of the biosphere and technosphere (0191-2021-0004).

Введение

Согласно современным оценкам, эмиссия парниковых газов (ПГ, диоксид углерода, метан и оксиды азота) из почвы существенно превышает промышленные выбросы. На основании многочисленных данных делается вывод о том, что агроэкосистемы в большинстве случаев являются чистым источником CO_2 , а секвестрация происходит только при переводе сельскохозяйственных угодий в залежь. При этом как эмиссия ПГ, так и их поглощение происходит в результате микробной трансформации органического вещества почв, и эти процессы, особенно в почвах лесных экосистем, до сих пор характеризуются высокой неопределенностью.

Количество органического вещества в почве является функцией добавления свежего органического вещества и скорости разложения, причем на последнюю влияет ряд внутренних и внешних параметров (например, содержание влаги в почве и температура, состав и активность сообщества микробов, и текстура почвы). Модели, описывающие динамику органического вещества почвы, обычно содержат ряд концептуально различных пулов, связанных между собой рядом потоков массы. Первый набор пулов, как правило, связан со свежим органическим веществом и учитывает его качество, при этом более высокое качество связано с более быстрым разложением. Второй набор пулов дифференцирует различные фракции органического вещества почвы с разным временем оборота. Микробная биомасса представляет собой пул органического вещества почвы с самым высоким оборотом, через который проходит большая часть добавленного органического углерода.

Помимо углерода, некоторые модели, такие как Century [1], также моделируют динамику азота и фосфора и их биогеохимические циклы.

Уровень сложности моделей органического вещества почвы возрастает с увеличением количества резервуаров и потоков. Простые модели обычно содержат значительный объем эмпирической информации, полученной путем калибровки по доступным измерениям для определенной среды. Очевидно, что применимость этих параметров ограничена этой средой. Более сложные модели содержат дифференциальные уравнения, механически связывающие различные пулы органического вещества почвы. Основным преимуществом простых моделей, содержащих минимальное количество пулов и потоков, является то, что такие модели можно решать аналитически, и они не требуют методов моделирования.

Можно выделить несколько причин для исследований по моделированию органического вещества почвы. Во-первых, как уже говорилось ранее, органическое вещество почвы состоит из целого ряда органических веществ с различной устойчивостью к микробной деградации и постоянно пополняется различными источниками свежего органического вещества. Обобщение имеющихся знаний в форме имитационной модели может существенно помочь понять, как взаимодействуют различные органические материалы и пулы органического вещества почвы, и разработать исследовательские гипотезы. Во-вторых, после изменений в землепользовании может пройти несколько лет, прежде чем органический углерод почвы достигнет нового устойчивого состояния. Хотя исследования для количественной оценки этих изменений в углероде почвы необходимы для калибровки долгосрочных модулей любой модели органического вещества почвы, ясно, что такие работы не могут быть организованы для рассмотрения всех возможных сценариев землепользования. Хорошо откалиброванная модель может использоваться для оценки воздействия различных сценариев землепользования на конечное содержание органического углерода в почве и служить руководством для ученых и политиков при разработке руководящих принципов, благоприятствующих накоплению углерода. В-третьих, модели, которые количественно учитывают модификаторы процесса разложения, связанные с почвой и окружающей средой, позволяют экстраполировать динамику углерода из полевого масштаба на более широкий регион и помогают в разработке региональных профилей углерода.

В настоящее время большой интерес к моделям органического вещества связан с изменением климата. Это связано как с влиянием температурных колебаний на обратимую динамику органического вещества, так и с выделением и/или поглощением ПГ. Количественные и даже качественные оценки риска изменения климата в связи с динамикой выделения ПГ из органического вещества почв при этом чрезвычайно важны, также как важны и приемы управления этим экологическим риском.

Следовательно, целью статьи является описание моделей трансформации почвенного органического вещества (ПОВ) в связи с управлением рисками при эмиссии ПГ с использованием разрабатываемых биогеохимических технологий.

1. Моделирование органического вещества и оценка эмиссии ПГ в агроэкосистемах

Модели влияния внешних факторов на изменение запасов и потоков биогенных элементов в экосистемах и взаимодействия геосферных оболочек разного масштаба начали активно развиваться во второй половине XX в., в том числе для воспроизведения взаимосвязей между потеплением климата, концентрацией парниковых газов в атмосфере и депонированием углерода в наземных экосистемах (рис. 1).

Можно отметить, по крайней мере, два аналитических обзора, посвященных моделированию органического вещества почв [3, 4]. В них отмечено, что в настоящее время существующие углеродные модели могут быть разделены на глобальные (углерод-азотные и многоэлементные) и экосистемные, а последние, в свою очередь, на чисто углеродные (агроэкосистемные, фитоценоотические, эмиссии парниковых газов) и углерод-азотные (широкого спектра экосистем, лесные, микробиологические). При оценке именно

углеродных моделей можно выделить такие их достоинства, как:

- совокупный учет типа почвы, растительного покрова и землепользования;
- прогноз эмиссии парниковых газов от сельского хозяйства и разработка стратегии ее снижения.

При выращивании сельскохозяйственных культур происходит системное воздействие на крупнейшие пулы наземной части биогеохимического цикла углерода — растительную биомассу и почвенное органическое вещество. Одновременно сельское хозяйство, как уже отмечено, является одним из основных источников парниковых газов, что неизбежно в связи с потребностями растущего населения Земли в продовольствии и ресурсах.

Существуют значительные сложности применения математических методов при описании цикла углерода. К ним можно отнести, прежде всего, многообразие методик расчета. Но единого метода оценки потоков парниковых газов на сегодняшний день не существует. Могут быть использованы, например, при

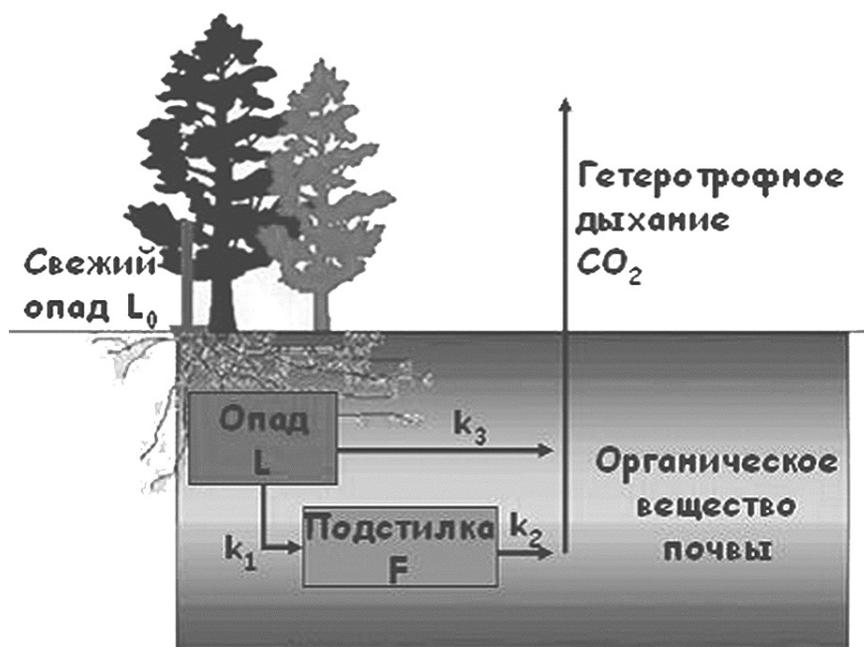


Рис. 1. Принципиальная схема основных пулов и потоков, используемых при моделировании органического вещества в различных экосистемах (на основании [2])

Figure 1. Schematic diagram of the main pools and flows used in modeling organic matter in various ecosystems (based on [2])

международных оценках «Национальные кадастры антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов...». При этом учитывается только антропогенная эмиссия, причем поток парниковых газов от пахотных почв разделяется всего на две части: в секторе «Землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства» учитываются показатели прямой эмиссии CO_2 и CH_4 ; в секторе «Сельского хозяйства» представлены эмиссия CO_2 от известкования и внесения мочевины, CH_4 от рисоводства и использования органических удобрений, а также выбросы N_2O из почв. Этого явно недостаточно для построения надежных прогнозных моделей, что и наблюдается на практике [4]. Лесные экосистемы просто не учитываются, что отражается, в частности, на оценках эмиссии ПГ для России.

Также применяются балансовые подходы — для определения динамики CO_2 в наземных экосистемах в различных масштабах [5], картографические методы — наложение друг на друга различных типов карт для интеграции потоков CO_2 в пахотных почвах [6], геоинформационный анализ — для оценки поглощения CO_2 лесами и потенциального запаса углерода в растительном покрове [7], регрессионные зависимости эмиссии CO_2 от гидротермических или почвенно-климатических параметров среды [8]. При этом точность моделирования зависит от высокого количества и качества входных данных. Неоднородность методов определения ПОВ и недостаточность экспериментальных данных для построения моделей служат серьезными факторами, сдерживающими развитие моделирования. Нужно подчеркнуть, что для корректной оценки ПОВ и биогеохимических потоков модель должна быть сайт-специфической, т.е. модифицирована или настроена в соответствии с конкретными условиями местности, с почвенными, растительными и климатическими характеристиками, которые используются как входные параметры.

Эта проблема может быть решена благодаря использованию официальной статистической информации и данных литературных источников, которые хорошо проявляют себя при апробации моделей для расчетов потоков углерода в агроценозах [9]. Второй вариант решения — применение ансамблевого [10], или мультимодельного, подхода [11], при котором общая модель представляется в виде совокупности локальных моделей, и вводятся переменные, характеризующие региональные особенности [12].

Имитационное экспериментальное моделирование минерализующей способности почв

В настоящее время количественная оценка минерализации углерода и азота из органического вещества почвы все еще остается сложной задачей. Как уже отмечено выше, показатели минерализации зависят от свойств почвы, количества и качества органических веществ и климатических факторов. Например, исследования с применением ^{15}N -индикаторов показывают, что N, минерализованный из ПОВ, может обеспечить >50% N, усваиваемого сельскохозяйственными культурами в течение вегетационного периода, несмотря на частое применение N-удобрений [1, 13]. В то же время именно влияние вносимых азотных удобрений на минерализацию ПОВ, как правило, не учитывается при экспериментальном моделировании этого процесса. Наряду с этим известны различные технологические приемы и методы, использование которых позволяет как рассчитывать, так и определять аналитически, с использованием меченных изотопом ^{15}N азотных удобрений, это воздействие. Однако в практике такие оценки эффективности использования азота не получили практического воплощения, зачастую в связи с их высокой стоимостью [14].

Необходимо было разработать достаточно простой, но в то же время информативный метод определения азот-минерализующей способности (АМС) почв с использованием имитационного экспериментального моделирования ПОВ.

Так, оценка азот-минерализующей способности почвы может быть выполнена на основании метода определения минерализуемого азота почвы, эквивалентного по доступности азоту удобрений, проводимого в условиях компостирования образцов с возрастающими дозами азотных удобрений. Компостирование образцов почвы проводится при оптимальных условиях температуры (18–28 °C) и влажности (60% ППВ) в течение четырех недель с набором (4–6) доз азотных удобрений, эквивалентных планируемым под различные сельскохозяйственные культуры. Величина АМС почвы определяется путем нахождения первой производной квадратического уравнения регрессии, описывающего накопление доступного минерального азота в почве в зависимости от доз вносимых азотных удобрений. Влияние гидротермических условий вегетационного периода

учитывают с помощью долгосрочных метеорологических прогнозов или на основе среднесрочных данных для конкретного региона. Это осуществляется с использованием поправок к скорости накопления доступного азота в почве при компостировании в зависимости от условий температуры и влажности. Используя математическое выражение зависимости накопления доступного азота в почве при компостировании от доз азотных удобрений, можно оценить АМС, которая будет включать в себя весь потенциально доступный азот почвенного фонда, способного к минерализации в течение прогнозируемого вегетационного периода.

Применение подходов имитационного экспериментального моделирования при определении АМС позволяет оценивать актуальные величины минерализации азота ПОВ. Именно эти величины могут быть в течение ближайшего прогнозируемого вегетационного сезона. В этом ее отличие от азот-минерализующего потенциала, когда определяется потенциально минерализуемый азот. Поэтому величины, оцениваемые по предлагаемому методу, будут в основном меньше.

Так была оценена АМС серой лесной почвы в условиях многофакторного эксперимента. В этом эксперименте было оценено влияние трех видов обработки почвы: отвальная на основе плуга, поверхностная на основе фрезы и комбинированная (поверхностная + безотвальное рыхление); трех режимов удобрения: без удобрения, оптимальный уровень (60 кг N/га для ячменя и 90 кг N/га для озимой пшеницы) и высокий уровень (120 кг N/га + 20 т/га навоза для ячменя и 120 кг N/га + 40 т/га навоза для озимой пшеницы). Оценка величин АМС была проведена для 0–20 и 20–40 слоев почвы. Изучение вида выращиваемой культуры и, соответственно, степени удобрения почвы было проведено также на выщелоченном тяжелосуглинстом черноземе и дерново-подзолистой супесчаной почве. Величина АМС в целинном черноземе была выше, чем в целинной разности дерново-подзолистой почвы. Внесение органических удобрений под технические культуры, такие как картофель и конопля, а также под кукурузу и озимую пшеницу (40–100 т/га навоза КРС) приводило к увеличению АМС как чернозема, так и дерново-подзолистой почвы [15].

Потенциальная минерализационная способность органического вещества выщелоченного чернозема

была изучена при разных системах удобрения полевых культур, включающих внесение возрастающих доз навоза и минеральных удобрений. Также были оценены эти величины в условиях залежного использования ранее обрабатываемых угодий. При этом кумулятивное потенциальное продуцирование почвами CO_2 в течение опыта превышало его эмиссию на протяжении вегетационного сезона почти в 12 раз под растениями и в 8 раз на залежи ($\gamma = 0.730$). Оцениваемое выделение CO_2 характеризовало различия между почвами по содержанию общего и микробного углерода. Экспериментально зафиксированная эмиссия CO_2 возрастала в присутствии растений и стимулировалась внесением азотных удобрений. Константа скорости минерализации (k) сут⁻¹ изменялась от 0.005–0.006 при внесении навоза до 0.014–0.019 при дополнительном внесении минеральных удобрений. При этом, несмотря на максимальные запасы потенциально-минерализуемого углерода, в залежи величина константы скорости минерализации была 0.009.

Продуцирование и эмиссия CO_2 коррелировали в динамике с нетто-мобилизацией почвенного азота ($\gamma = 0.845 - 0.976$ и $r = 0.905 - 0.942$, соответственно). На единицу нетто-мобилизованного азота в почве продуцировалось 40–80 и выделялось в атмосферу 4–8 единиц C– CO_2 [16]. Имитационное экспериментальное моделирование ПОВ позволяет оценивать и другие биогеохимические параметры. Так, интенсивность выделения CO_2 почвой за длительный период инкубации при постоянных условиях дает представление о доступности ПОВ микроорганизмам в качестве источника питания и энергии. В течение начальных девяти суток наибольшая скорость выделения CO_2 была в почве с применением минеральных удобрений и внесением навоза 10 т/га. Несколько меньше диоксида углерода образовывалось в почве с внесением только одного навоза. С течением времени скорость выделения углекислого газа была постоянной. При этом в почве с внесением минеральных удобрений она была ниже, чем без их применения. Скорость продуцирования CO_2 почвой залежи по сравнению с вариантами опыта была значительно выше на протяжении всего периода инкубации, к концу наблюдений она постепенно снижалась до < 1 мг C– CO_2 /100 г почвы в сутки. Размеры суммарной продукции CO_2 почвой оцениваемых вариантов

за 125 суток эксперимента достигали 200–300 мг C–CO₂/100 г почвы на залежи, на вариантах с применением навоза в дозах 5–10 т/га — 60–80 мг C–CO₂/100 г почвы, а при совместном применении навоза и минеральных удобрений уменьшались до 40–60 мг C–CO₂/100 г почвы, причем меньшие величины были показаны при внесении повышенных доз. Аппроксимируя кривые кумулятивного продуцирования CO₂ за время инкубации однокомпонентным уравнением кинетики первого порядка, можно определить содержание потенциально-минерализуемого углерода в выщелоченном черноземе с разными системами удобрения полевых культур [17].

2. Моделирование органического вещества и оценка эмиссии ПГ в лесных экосистемах

Система моделирования лесных экосистем EFIMOD [18, 19] предназначена для моделирования биологических циклов элементов в лесных экосистемах таежной зоны и смешанных лесов. Модельная система рассчитывает параметры углеродного и азотного баланса (чистая первичная продукция, дыхание почвы, азот, доступный растению в почве, биомасса отдельных деревьев по отделам, запасы органического вещества и азота в почве, потребление азота растениями) и таксационные характеристики древостоев (плотность, полнота, средняя высота и диаметр, запас древесины). Модельная система включает в себя модель динамики органического вещества почвы ROMUL, которая рассчитывает динамику запасов ПОВ на основе химических свойств подстилки, температуры и влажности подстилки и минеральной почвы. Статистический генератор почвенного климата SCLISS предназначен для генерации почвенных и климатических характеристик. EFIMOD позволяет учитывать воздействие лесохозяйственных работ и лесных пожаров. Модель учитывает два типа взаимодействия между деревьями: конкуренцию за свет и конкуренцию за доступный азот в почве, что позволяет моделировать возобновление и различные рубки. Модельная система EFIMOD сочетает популяционный и балансовый подходы в моделировании экосистем и позволяет проводить краткосрочное и долгосрочное моделирование параметров экосистем на местном и ландшафтном уровнях. Первоначально модель была разработана для лесов таежной зоны, а затем расширена для хвойно-лиственных лесов.

Однако модельная система не параметризована для засушливых и болотистых местообитаний. Модель работает на уровне небольшого лесного массива. Тем не менее, она была дополнена специальным модулем, который позволяет моделировать динамику лесных экосистем на уровне лесного хозяйства (используя данные лесной таксации), сохраняя при этом высокий уровень пространственной детализации, модель ROMUL (рис. 2).

На рисунке 2 показана интеграция структуры модели ROMUL для одной когорты наземных опавших листьев, пищевых сетей и паразитирующих дождевых червей в модели Romul_Hum. Поступление подстилки — опадающие наземные листья; L — неразложившийся свежий лиственный опад в органическом слое; F — частично разложившийся органический слой лесной подстилки или лугового газона; Ha — сильно разложившийся (гумифицированный) органический слой (под-горизонт H); Fresh castles — свежие остатки паразитирующих дождевых червей; H stable — устойчивое гумифицированное ПОВ в минеральных горизонтах верхнего слоя почвы (Ah или Ahe); FW module — модуль для расчета экскрементов микро- и мезофауны и некромассы с использованием почвенных пищевых сетей (включая Enchytraeidae); A.e. module — модуль для расчета активности паразитических дождевых червей; A.e. cons. — потребление (заглатывание) органического мусора насекомыми, дождевыми червями; Hum L, Hum F — поток преобразованного (гумифицированного) материала из пулов L в F и из пулов F в пулы Ha соответственно; Mi — степень минерализации соответствующих пулов ПОВ; St. — стабилизация ПОВ по мере старения свежих отходов; удвоенные выровненные стрелки — потоки ПОВ (процессы минерализации и трансформации); пунктирные линии — информационные ссылки на минерализацию углерода (в виде гетеротрофного дыхания [Rh]) в модуле FW и расчетные значения побочных продуктов в соответствующих потоках ПОВ; пунктирные линии — модуль дождевых червей ссылается на свежие образцы и стабильные запасы. Перенос и потери ПОВ из-за выщелачивания, бокового поступления и отвода внутренних почвенных вод и эрозии на этом рисунке не представлены.

Модельная система EFIMOD широко применяется для моделирования динамики лесных экосистем

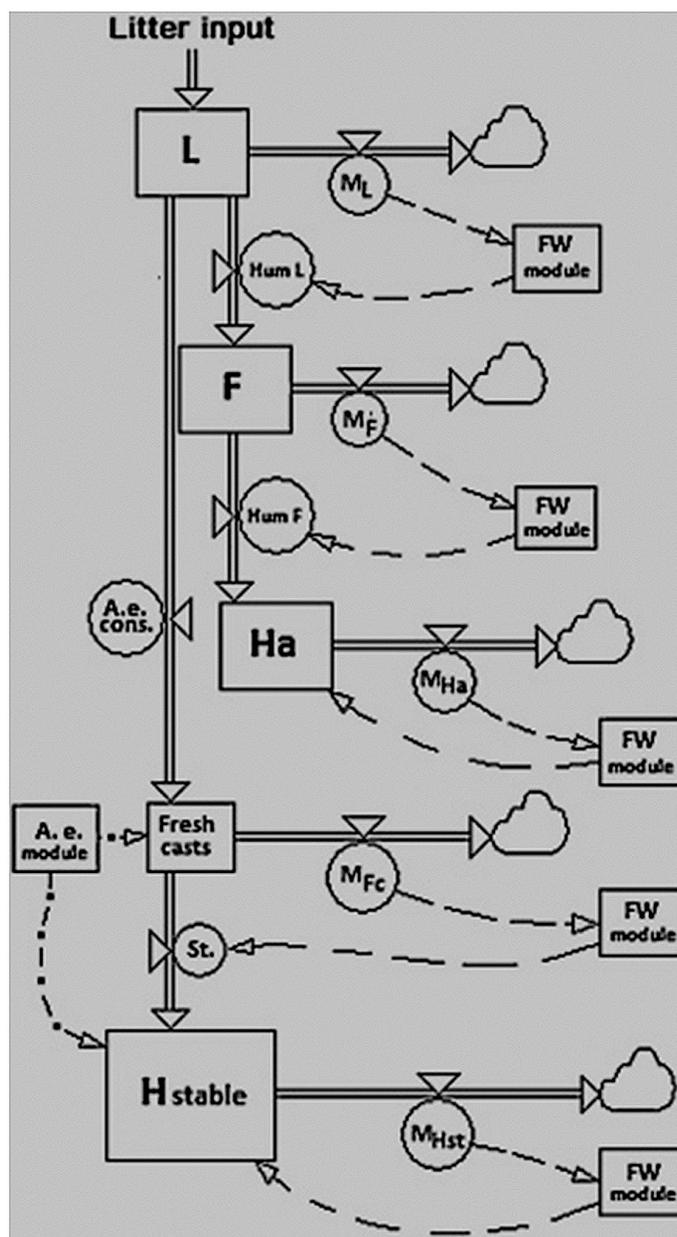


Рис. 2. Структура модели ROMUL

Figure 2. ROMUL model structure

в Европе и Северной Америке с использованием местных экспериментальных и аналоговых данных для оценки углеродного баланса и содействия принятию решений. Модельная система также использовалась для оценки различных режимов лесопользования с точки зрения углеродного баланса, продуктивности лесных

экосистем, оценки разнообразия и влияния изменения климата и внешних воздействий на эти показатели.

Так, результаты имитационного моделирования динамики и пространственной вариабельности позволяют оценить распределение пулов и потоков углерода в лесных почвах. В частности, можно привести

пример дерново-подбур (Entic Carbic Podzols) под полидоминантным сосново-широколиственным лесом в Приокско-Тerrasном государственном заповеднике (южное Подмосковье; 54.89° N, 37.56° E) [20]. Выполнены числительные эксперименты на базе системы моделей EFIMOD3, включающей почвенную модель динамики органического вещества и азота Romul_Hum. С применением этих моделей показано формирование неоднородности и контрастности пространственного распределения почвенных пулов органического вещества и интенсивности дыхания лесных почв (выделение CO₂), связанное с различием в поступлении растительного опада и изменчивостью почвенно-гидротермических условий под пологом древостоя.

На рисунке 3 представлены расчеты запасов органического вещества почвы и интенсивности выделения CO₂ (гетеротрофного дыхания почвы) для конца вегетационного сезона (ноябрь). Наибольшие запасы углерода в почве формируются на участке относительно компактного совместного произрастания крупных деревьев осины и молодых лип под их кронами. Это связано с повышенным количеством, а также качеством поступающего на поверхность

почвы листового и корневого опада этих видов. Под сосной и в «окнах» первого яруса древостоя рассчитанные показатели ниже. Контрастность распределения углеродного пула почв в пределах рассматриваемого участка изменяется примерно в 3–4 раза, меняясь от 2 до 6–8 кг м⁻² (в пересчете на C_{орг}).

Схожая пространственная картина получена для интенсивности гетеротрофного дыхания почв (выделения CO₂), которая для рассматриваемых позднеосенних метеорологических условий оценивается в среднем на уровне 0.03–0.05, с увеличением на локальных участках до 0.07 кг C–CO₂ м⁻² и выше.

3. Биогеохимические технологии для управления рисками эмиссии ПГ

В основу 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, быстрорастущие на легкодоступных соединениях, и K-стратеги — медленно, но эффективно минерализующие труднодоступный углерод (в том числе гуминовые вещества). Показано,

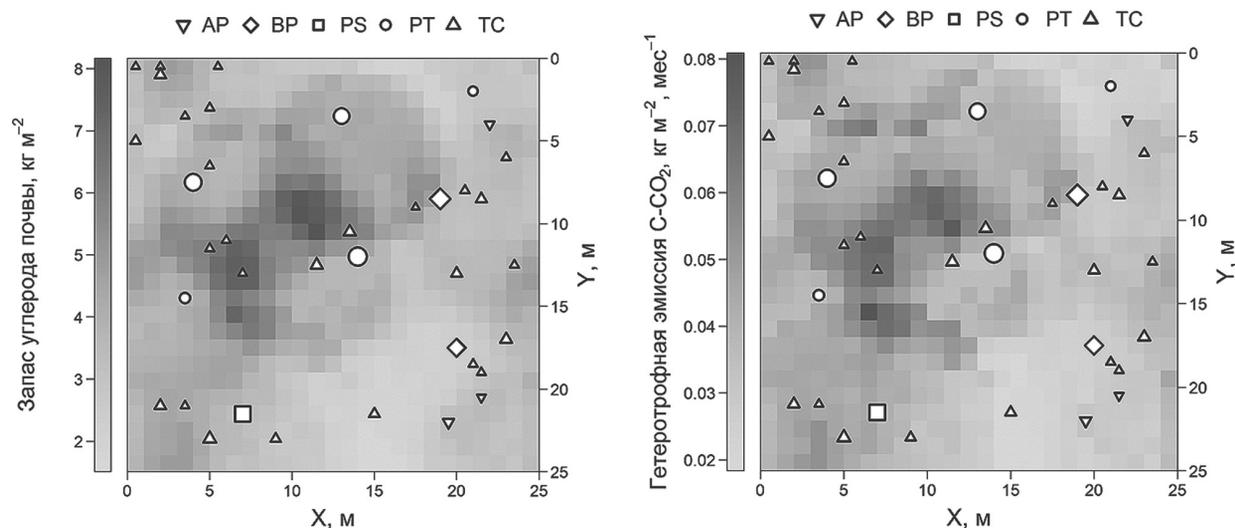


Рис. 3. Оценки варьирования почвенных запасов C_{орг} (слева) и выделения CO₂ (справа) для поздне-осенних условий (расположение деревьев показано условными знаками: AP — *Acer platanoides*, BP — *Betula* spp., PS — *Pinus sylvestris*, PT — *Populus tremula*, TC — *Tilia cordata*; размер знаков пропорционален диаметру деревьев)

Figure 3. Estimates of variation in soil stocks of Sorghum C (left) and CO₂ emissions (right) for late autumn conditions (the location of trees is shown by conventional signs: AP — *Acer platanoides*, BP — *Betula* spp., PS — *Pinus sylvestris*, PT — *Populus tremula*, TC — *Tilia cordata*; the size of the signs is proportional to the diameter trees)

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. В целом, смена доминирующей экологической стратегии микробного сообщества почвы является механизмом адаптации почвенных микроорганизмов к изменению экологической ситуации.

Биогеохимические природоподобные технологии регулируют работоспособность микробного звена биогеохимических круговоротов в агроэкосистемах. Как правило, эти технологии включают в себя применение различных минеральных и органических удобрений, мелиорантов и отходов сельскохозяйственного производства.

Природоподобные технологии для управления микробным звеном биогеохимических циклов в агроэкосистемах обеспечивают снижение риска эмиссии ПГ. Они включают в себя различные технологические процессы. Прежде всего, это те технологические принципы, которые направлены на оценку минерализующей способности почв — (Авторские свидетельства СССР 1206703, 1753415). При этом восстановление микробного звена биогеохимического круговорота при рекультивации загрязненных почв может происходить с использованием различных технологических приемов, включающих: контроль очистки почв, загрязненных углеводородами, и нейтрализацию углеводородных шламов посредством анализа активности дегидрогеназы (Патент РФ 2387995); контроль эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв различного гранулометрического состава посредством анализа активности дегидрогеназы (Патент РФ 2387996); оценку эффективности рекультивации посредством торфа нарушенных тундровых почв с различной полной влагоемкостью (Патент РФ 2611159); контроль эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв различного гранулометрического состава посредством анализа активности дегидрогеназы (Патент РФ 2491137); получение гумата калия из местных торфов Ямало-Ненецкого автономного округа (Патент РФ 2610956); оценку эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв посредством внесения местного торфа и гумата калия (Патент РФ 2611165); биохимический контроль эффективности

рекультивации нарушенных и загрязненных тундровых почв (Патент РФ 2672490).

Кроме того, происходит и реабилитация загрязненных почв, что приводит также к снижению риска эмиссии ПГ. Это включает в себя: биогеохимический мониторинг и оценку режимов функционирования агроэкосистем на техногенно загрязняемых почвах; контроль очистки почв, загрязненных углеводородами, и нейтрализации углеводородных шламов посредством анализа активности каталазы (Патент РФ 2387995). Необходимо подчеркнуть, что такие природоподобные биогеохимические технологии позволяют также снижать риск поступления остатков ДДТ в организм человека путем идентификации источника и времени загрязнения окружающей среды и биологических субстратов человека пестицидом ДДТ в регионах Крайнего Севера (Патент РФ 2701554) и риски загрязнения вод при идентификации микробного загрязнения водной среды посредством анализа активности фермента дегидрогеназы (Патент РФ 2735756) [21–24].

В таблице показан пример управления потоками ПГ из нарушенных и рекультивируемых почв в импактных зонах газовой промышленности.

Эти изменения отражают восстановление температурного режима во время рекультивации пастбищ, что способствует меньшей минерализации органического вещества (торфяного материала) и меньшей эмиссии CO_2 .

Необходимо подчеркнуть, что отмеченные биогеохимические технологии могут также включать в себя и другие технологические подходы, способствующие восстановлению нативной микрофлоры, например, при загрязнении почв тяжелыми металлами и нефтепродуктами [24], другие приемы и методы, направленные на регулирование биогеохимической структуры экосистем в целом.

Следовательно, необходимо отслеживать все слабые биогеохимических циклов углерода и азота от микробного звена до человека, как замыкающего пищевые трофические цепи. Важно понимать и оценивать экономические и социальные измерения как эмиссии CO_2 в атмосферу, так и влияние повышенных концентраций этого газа на здоровье людей. Здесь заслуживают внимания подходы, используемые при экономической оценке эмиссии промышленных газов на здоровье людей в различных провинциях Китая [25].

Таблица. Поток углекислого газа из нарушенной и рекультивированной тундровой почвы на оленьих пастбищах

Table. Carbon dioxide fluxes from disturbed and reclaimed tundra soil in deer pastures

Почва	Максимальная скорость эмиссии, мкмоль CO ₂ м ⁻² ч ⁻¹	Общая дневная эмиссия, г CO ₂ м ⁻² дн ⁻¹	Изменение баланса CO ₂ , мкмоль CO ₂ м ⁻² дн ⁻¹	Общее дыхание экосистемы, мкмоль CO ₂ м ⁻² дн ⁻¹
Нарушенная	0.21	1.02	0.12	0.62
Рекультивируемая	0.04	0.21	0.19	0.19

Это дает возможность управлять в целом рисками, связанными с эмиссией ПГ вследствие трансформации органического вещества почв при различных сценариях изменения климата, от глобальных до региональных усилений его континентальности.

Заключение

Анализ современной литературы показывает, что агроэкосистемы в большинстве случаев являются чистым источником CO₂, а секвестрация происходит лишь при переводе сельскохозяйственных земель в залежные. Микробное звено биогеохимических циклов в агроэкосистемах отвечает за процессы эмиссии CO₂, секвестрации и трансформации углеродных соединений в почвах. Среди факторов, направленных на управление этим микробным звеном, можно отметить следующие:

- внесение минеральных и органических удобрений;
- направленность процессов минерализации почвенного органического вещества и приемы управления сопряженной углерод- и азот-минерализующей способностью почв;
- изменение продуктивности сельскохозяйственных экосистем в условиях возрастающей концентрации двуокси углерода в атмосфере и почвенном воздухе;
- агротехнологические приемы, включая применение нулевой обработки почв, органических удобрений различной природы, а также различных мелиорантов, в том числе фосфогипса;
- рекультивация нарушенных и загрязненных почв, переувлажненных и/или переосушенных почв, влияющая на потоки CO₂.

Углеродные модели могут быть разделены на глобальные (углерод-азотные и многоэлементные)

и экосистемные. Последние разбиты на углеродные (агроэкосистемные, фитоценоотические, эмиссии парниковых газов CO₂ и CH₄) и углерод-азотные (широкого спектра экосистем, лесные, микробиологические, например, Century 5.0).

Основные сложности применения математических методов для моделирования органического вещества связаны с:

- многообразием методик расчета;
- высокими требованиями к входным данным;
- ограниченной доступностью исходной информации;
- необходимостью отражения климатических изменений;
- погрешностями в описании функциональной зависимости эмиссии CO₂ от температуры.

Двойная роль почвы как стока и источника парниковых газов, взаимодействие углеродного и азотного циклов, разделение пула почвенного органического углерода на фракции, а также соотношение микробного и корневого дыхания считаются основными проблемами при количественной оценке компонентов биогеохимического цикла углерода. Развитие моделей будет способствовать лучшему учету потоков парниковых газов, повышению точности оценки влияния на них климатических и антропогенных факторов, разработке стратегии снижения их эмиссии.

Необходима дальнейшая разработка и использование биогеохимических технологий, направленных на восстановление биогеохимических циклов в агроэкосистемах, в первую очередь в микробном звене, регулирующем потоки CO₂.

Требуется управлять рисками эмиссии парниковых газов при изменении органического вещества почв, отражающего его дуальную роль при различных сценариях изменения климата.

Список источников [References]

1. Bashkin V.N. Modern biogeochemistry: Second edition: Environmental risk assessment . 2006. P. 1–444. <https://doi.org/10.1007/1-4020-4586-7>
2. Безрукова М. Г., Быховец С. С., Грабарник П. Я. [и др.] Анализ неопределенности параметров модели разложения органического вещества: байесовский подход // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11. № 1–7. С. 1424–1429 [Bezrukova M. G., Bykhovets S. S., Grabarnik P. Ya. [et al.] Analysis of uncertainty of parameters of a decomposition organic matter model: bayesian approach // Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2009;11(1–7):1424–1429. (In Russ.)]
3. Campbell E. E., Paustian K. Current developments in soil organic matter modeling and the expansion of model applications: a review. 2015 Environ. Res. Lett. 10 123004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/123004>
4. Суховеева О. Э. Проблемы моделирования биогеохимического цикла углерода в агроландшафтах // Ученые записки Казанского университета. Серия естественные науки. 2020. Т. 162. № 3. С. 473–501. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.3.473-501> [Sukhoveeva O. E. Problems of modeling carbon biogeochemical cycle in agricultural landscapes // Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki. 2020;162(3):473–501. (In Russ.). <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.3.473-501>]
5. Friedlingstein P., Jones M. W., O'Sullivan M. et al. Global Carbon Budget 2019. Earth Syst. Sci. Data, 2019;11(4): 1783–1838. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>
6. Заварзин Г. А. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука. 2007. 315 с. [Zavarzin G. A. (Ed.) Carbon Pools and Fluxes in Russian Terrestrial Ecosystems]. М.: Nauka. 2007. 315 p. (In Russ.)]
7. Volodin E. M. Atmosphere-ocean general circulation model with the carbon cycle. Izv., Atmos. Oceanic Phys., 2007;43(3):266–280. <https://doi.org/10.1134/S0001433807030024>
8. Chen S., Zou J., Hu Z., Chen H., Lu Y. Global annual soil respiration in relation to climate, soil properties and vegetation characteristics: Summary of available data. Agric. For. Meteorol., 2014;198–199:335–346. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.08.020>
9. Суховеева О. Э., Карелин Д. В. (2019). Параметризация модели DNDC для оценки компонентов биогеохимического цикла углерода на Европейской территории России. Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле, 64 (2), 363–384. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.211> [Sukhoveeva O. E., Karelin D. V. (2019). Parametrization of the model DNDC for evaluating components of carbon biogeochemical cycle in the European part of Russia. Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences, 64 (2), 363–384. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.211> (In Russ.)]
10. Müller C., Bondeau A., Popp A., Waha K., Fader M. Climate Change Impacts on Agricultural Yields: Background Note to the World Development Report. Washington, DC, World Bank, 2010. 12 p. Available at: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/9065>
11. Cantelaube P., Terres J.M. Seasonal weather forecasts for crop yield modeling in Europe. Tellus, 2005;57(3):476–487. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v57i3.14669>
12. Oettli P., Sultan B., Baron C., Vrac M. Are regional climate models relevant for crop yield prediction in West Africa? Environ. Res. Lett. 2011;6(1). art. 014008, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/1/014008>
13. Gardner, J.B. and Drinkwater, L.E., The fate of nitrogen in grain cropping systems: a meta-analysis of 15N field experiments, Ecol. Appl., 2009, vol. 19, no. 8, pp. 2167–2184. <https://doi.org/10.1890/08-1122.1>
14. Башкин В. Н. Увеличение эффективности использования азота: оценка азотминерализующей способности почв // Российская сельскохозяйственная наука. 2022. № 3. С. 45–50. <https://doi.org/10.31857/S2500262722030097> [Bashkin V. N. Increasing the efficiency of nitrogen use: assessment of the nitrogen mineralizing ability of soils // Russian Agricultural Science. 2022;(3):45–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2500262722030097>]
15. Башкин В. Н. Оценка величин азотминерализующей способности в различных почвенно-экологических регионах // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2022. № 3(171). С. 117–122 [Bashkin V.N. Estimation of nitrogen mineralizing capacity in various soil-ecological regions // Use and Protection of Natural Resources of Russia. 2022;(3):117–122. (In Russ.)]
16. Семенов В.М. Функции углерода в минерализационно-иммобилизационном круговороте азота в почве // Агрохимия. 2020. № 6. С. 78–96. <https://doi.org/10.31857/S0002188120060101>

- [Semenov V.M. Functions of carbon in the mineralization-immobilization turnover of nitrogen in soil // *Agrochimia*. 2020;(6):78–96. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S0002188120060101>]
17. Кузнецова Т.В., Семенов А.В., Ходжаева А.К. [и др.] Накопление азота в микробной биомассе серой лесной почвы при разложении растительных остатков // *Агрохимия*. 2003. № 10. С. 3–11 [Kuznetsova T.V., Semenov A.V., Khodzhaeva A.K. [et al.] Nitrogen accumulation in the microbial biomass of gray forest soil during the decomposition of plant remains // *Agrochimia*. 2003;(10):3–11. (In Russ.)]
 18. Komarov A., Bykhovets S., Frolov P. [et al.] Romul_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. I. Problem formulation, model description, and testing // *Ecological Modelling*. 2017;345:113–124. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.08.007>
 19. Chertov O., Komarov A., Bykhovets S. [et al.] Romul_Hum — A model of soil organic matter formation coupling with soil biota activity. II. Parameterisation of the soil food web biota activity // *Ecological Modelling*. 2017;345:125–139. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.10.024>
 20. Моделирование биогенных циклов углерода в лесных почвах с учетом структуры растительных сообществ / И.В. Припутина, В.Н. Шанин, П.В. Фролов, С.С. Быховец // *Эволюция биосферы, биогеохимические циклы и биогеохимические технологии: связь фундаментальных и прикладных исследований: Материалы XIII Международной биогеохимической школы-конференции, посвященной 160-летию со дня рождения В.И. Вернадского, Пущино, Московская обл., 25–29 сентября 2023 года.*— Пущино: ООО «Товарищество научных изданий КМК». 2023. С. 150–152. [Modelling the biogenic cycles of carbon in forest soils taking into account spatial structure of plant communities / I.V. Pripulina, V.N. Shanin, P.V. Frolov, S.S. Bykhovets // In the collection of Materials of the XIII International Biogeochemical school-conference. The evolution of the biosphere, biogeochemical cycles and biogeochemical technologies: the connection between fundamental and applied research. Pushchino, September 25–28, 2023. P. 150–153. (In Russ.)]
 21. Bashkin V, Alekseev A, Levin B, Mescherova E. Biogeochemical Technologies for Managing CO₂ Flows in Agroecosystems. *Adv Environ Eng Res* 2023; 4(1): 012; <https://doi.org/10.21926/aeer.2301012>
 22. 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> [Bashkin V.N., Pripulina I.V., Galiullina 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>]
 23. Башкин В.Н., Галиулина Р.А. Оценка риска загрязнения окружающей среды и биологических субстратов человека пестицидом ДДТ и его метаболитами // *Проблемы анализа риска*. 2023. Т. 20. № 4. С. 28–42. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2023-20-4-28-42> [Bashkin V.N., Galiullina R.A. Assessment of the risk of the environmental and human biological substrates by the pesticide DDT and its metabolites // *Issues of Risk Analysis*. 2023;20(4):28–42. (In Russ.)
<https://doi.org/10.32686/1812-5220-2023-20-4-28-42>]
 24. Bashkin V.N. Biogeochemical Engineering: Technologies for Managing Environmental Risks. *Adv Environ Eng Res* 2022; 3(4): 040; doi:10.21926/aeer.2204040
 25. Xu X, Xu Z, Chen L, Li C. How Does Industrial Waste Gas Emission Affect Health Care Expenditure in Different Regions of China: An Application of Bayesian Quantile Regression. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019; 16(15):2748. <https://doi.org/10.3390/ijerph16152748>

Сведения об авторе

Башкин Владимир Николаевич: доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения 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. Пушкино, ул. Институтская, д. 2-2, ИФХБПП РАН

vladimrbashkin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию: 20.03.2024

Одобрена после рецензирования: 09.04.2024

Принята к публикации: 10.04.2024

Дата публикации: 28.06.2024

The article was submitted: 20.03.2024

Approved after reviewing: 09.04.2024

Accepted for publication: 10.04.2024

Date of publication: 28.06.2024