

СОВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ИДЕЙ В.И. ВЕРНАДСКОГО

© 2023 г. В. В. Ермаков*

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

**e-mail: vad-ermak@yandex.ru*

Поступила в редакцию 02.03.2023 г.

После доработки 13.04.2023 г.

Принята к публикации 18.04.2023 г.

Рассмотрены сущность и развитие, созданного В.И. Вернадским нового научного направления в геохимии и биологии — биогеохимии. Особое внимание акцентировано на концепциях — живое вещество, биогенная миграция химических элементов, химический элементный состав организмов и его экологическое значение. Дан анализ развития функций биосферы (экологическая, концентрационная, информационная). Показана дифференциация химического элементного состава организмов в условиях техногенеза биосферы. Представлена роль биогеохимии в развитии биотехнологии и формировании биогеохимической индикации экологического состояния таксонов биосферы. Дан краткий анализ достижений биогеохимии и существующих проблем.

Ключевые слова: В.И. Вернадский, биогеохимия, биосфера, живое вещество, биогенная миграция, биолиты, химические элементы, функции биосферы, техногенез, биогеохимическая индикация, экология

DOI: 10.31857/S0016752523100047, **EDN:** YHRINA

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы неоднородности, организованности и оптимального состояния биосферы, ее функционирования и трансформации всегда были и остаются центральными научными проблемами. Они напрямую связаны с познанием природы жизни как планетарного и космического явления, с исторической оценкой роли живого вещества в прошлом, настоящем и будущем, с определением места и роли человека в эволюции Земли и с прогнозной оценкой развития таксонов биосферы. Данная статья посвящена биогеохимии — оригинальному научному направлению, созданному В.И. Вернадским в начале XX столетия. Ее появлению предшествовал период становления самого ученого, его убежденности в возрастающей антропогенной активности человека, сравнимой с геологическими процессами. Гениальность В.И. Вернадского сочеталась с огромной любовью к природе и человечеству в целом, а в биогеохимии он выразил свои чувства и мысли об органической связи человека с планетарными и космическими процессами, о биосфере, о вечности жизни, единстве жизни и геохимической среды и становлении ноосферы (Вернадский, 1940, 1980).

Значение биогеохимии в развитии современных биосферных исследований трудно переоце-

нить, особенно при оценке глобальных техногенных процессов, внедрении новых технологий и материалов, диагностике и профилактике микро-элементозов животных и человека.

Биогеохимия

Понимание ряда функций биосферы Земли как области обитания и жизнедеятельности организмов, преобразующих земную кору, и планетарной роли человека стало возможным благодаря работам В.И. Вернадского (1922, 1940). Его концепции биосферы и ноосферы, идеи о геохимической роли живого вещества, формировании среды жизни привели к созданию нового раздела естествознания — биогеохимии, изучающей жизнь в аспекте миграции атомов и трансформации энергии.

Биогеохимия была основана В.И. Вернадским в 20-х гг. XX в. (Вернадский, 1940, 2016). Истоки биогеохимии относят к концу XIX в. в период работы В.И. Вернадского с В.В. Докучаевым, а также в “украинский” период его деятельности (1916–1918 гг.) (Вернадский, 1980). Научные исследования В.И. Вернадского под руководством В.В. Докучаева (1994) сформировали в нем широту взглядов на сложность происходящих в почвенной среде процессов. Это был начальный период

зарождения биогеохимии — оценка роли организмов в образовании минералов почв. В последующий период В.И. Вернадский создает концепцию биосферы как области обитания всех организмов (живого вещества), ставшей фундаментом биогеохимии.

Согласно В.И. Вернадскому, “биогеохимия в атомном аспекте научно охватывает изучение жизни в строении нашей планеты” (Вернадский, 1980; с. 10). “Биогеохимия — новая большая отрасль геохимии, изучающая влияние жизни на геохимические процессы, связывает по-новому науку о жизни с геологией и с науками об атомах” (Вернадский, 1980; с. 11). “Биогеохимия есть одна из наук, связанных с изучением атомов. Биогеохимия изучает влияние жизни на историю земных химических элементов, т.е. всех различных атомов земной коры; в частности, она исследует те перемещения земных атомов — миграции их масс, которые вызываются живыми организмами. ... Биогеохимия может быть рассматриваема в связи с этим как геохимия биогенных процессов ... Биогеохимия изучает атомный состав организмов, его отношение к атомной структуре области жизни, проявление всех тех свойств организма, которые непосредственно обуславливаются его атомным строением” (Вернадский, 1980; с. 13).

По определению В.В. Ковальского (1982), “Биогеохимия — наука о химии жизни и геохимии среды, их взаимодействии”. При этом “Основной задачей биогеохимии является изучение жизни и геохимической среды в их единстве как системы организованности развития, строения и функций биосферы”.

Существуют и другие определения этой науки, но неизменным остается участие организмов в геохимических и биосферных процессах. В связи с развитием геохимической экологии как одного из направлений биогеохимии, нами было дано следующее определение данной науки: Биогеохимия — *система знаний, системная наука об элементном составе живого вещества и его роли в миграции, трансформации и концентрировании химических элементов и их соединений в биосфере, о геохимических процессах с участием организмов, их взаимодействии с геохимической средой и геохимических функциях биосферы* (Ермаков, 2016).

Предметом изучения биогеохимии служат процессы и механизмы миграции химических элементов и их соединений между организмами и окружающей средой. Ее развитие стало возможным благодаря ученикам и последователям В.И. Вернадского. В.В. Ковальский (1991) отмечал, что рассмотрение поведения одного или группы химических элементов изолированно, вне связи организма и среды теряет смысл в биогеохимии, ибо биогеохимия системная наука.

Наиболее активно идеи биогеохимии стали реализовываться после организации В.И. Вернадским Биогеохимической лаборатории (БИОГЕЛ). В 1926 г. для выделения биогеохимических исследований в самостоятельное направление В.И. Вернадский организует при КЕПСе “Отдел живого вещества”, а в 1927 г. по его инициативе физико-математическое отделение АН приняло решение об организации самостоятельной Биогеохимической лаборатории. По последним опубликованным данным, она была учреждена в Радиевом институте не в 1928, а в 1926 г. Это следует из Записки В.И. Вернадского (2013) академику В.Л. Комарову — президенту АН СССР. Тем не менее, датой создания БИОГЕЛ считают 1 октября 1928 г., о чем В.И. Вернадский указывает в статье “О биогеохимии” (Вернадский, 2016). Таким образом, дата начала деятельности БИОГЕЛ — 1 октября 1928 г., а в 2023 г. исполняется 95 лет Лаборатории биогеохимии. Став первым ее заведующим (директором), В.И. Вернадский оставался им до конца своей жизни в течение 16 лет.

Научная цель БИОГЕЛ была сформулирована В.И. Вернадским как “познание явлений жизни с геохимической точки зрения”. Основные ее задачи, по В.И. Вернадскому, были следующими: определение химического элементного состава живых организмов, в том числе для химической характеристики вида; выяснение специфики изотопного состава элементов живой материи; определение геохимической (биогеохимической) энергии “живого вещества”; определение радиоактивных элементов в живых организмах и исследование вклада радиоактивности в геохимическую энергию “живого вещества” (Вернадский, 2016).

Биогеохимическая энергия живого вещества ($E_{бгх}$) определяется, прежде всего, размножением организмов, обусловливаемым энергетикой планеты, и подчиняется основным законам термодинамики, что обеспечивает существование и устойчивость такой системы, как биосфера. Живое вещество является носителем биогеохимической энергии и создателем ее в таком масштабе, в каком она не существует ни в одной земной оболочке. Существуют предел образования биогеохимической энергии человечества $E_{бгх} \leq X_{кр}$, т.е. существует область ($\Omega_{дон}$), которая зависит от скорости передачи жизни, и предел размножения человека. В данном случае $E_{бгх}$ — биогеохимическая энергия, $X_{кр}$ — критические значения биогеохимической энергии, связанные с природными катастрофами (Живетин, 2008).

Биосфера и ее функции

В.И. Вернадский разработал учение о биосфере — области обитания всего планетарного комплекса организмов, включив в биосферу геологические оболочки, заселенные ими в настоящее

время и в прошлом. Наиболее полное изложение этого учения представлено В.И. Вернадским в книге “Биосфера” (1926), а также в статье “Эволюция видов и живое вещество” (1928).

При характеристике биосферы В.И. Вернадский выделяет следующие ее функции: газовая, кислородная, окислительная, кальциевая, восстановительная, концентрационная, разрушения органических соединений, восстановительное разложение органических соединений, метаболизма и дыхания организмов (Вернадский, 1980; с. 288–289). Именно геохимическая деятельность организмов в основном определяет химический состав окружающей их среды. Поддержанию концентрации кислорода в атмосфере мы обязаны фотосинтетической деятельности зеленых растений. Главным фактором формирования химического состава вод биосферы также является живое вещество (Моисеенко, 2018; Романкевич, Ветров, 2021).

В настоящее время на основании биогеохимических принципов (Вернадский, 1940, 1980) и в работах более позднего периода (Будыко и др., 1985; Bashkin, Howarth, 2014) наиболее часто выделяют следующие основные функции биосферы:

- энергетическая, связанная с аккумулярованием и преобразованием энергии автотрофными и гетеротрофными организмами;
- биохимическая, состоящая в синтезе органических веществ с вовлечением макро- и микроэлементов (МЭ), их концентрированием и рассеиванием;
- трансформирующая, сущность которой состоит в минерализации органического вещества и в преобразованиях органических и неорганических соединений;
- транспортная, связанная с массопереносом вещества и биогенной миграцией химических элементов;
- средообразующая и гомеостатическая, состоящие в формировании геохимических свойств среды обитания и в обеспечении относительного постоянства внутренних сред организма и среды обитания;
- деструктивная, обеспечивающая разложение и трансформацию детрита организмов;
- экологическая, сущность которой заключается во взаимодействии различных групп организмов и компонентов среды внутри экосистем;
- информационная, обеспечивающая взаимодействие и регуляцию развития организмов и среды;
- космическая, обуславливающая периодичность миграционных и биологических ритмов, реакций организмов под влиянием космических факторов.

Указанные функции биосферы проявляются в своем единстве в локальных, региональных и глобальных биогеохимических циклах химических элементов, протекающих в процессе геологических циклов. Учитывая место биосферы Земли в Солнечной системе и Галактике, все масштабные биосферные изменения, связанные с ее энергией, массообменом вещества и продуктивностью, необходимо рассматривать во взаимосвязи с глобальными планетарными процессами и отдельными блоками более высокого порядка. Оценка взаимодействия локальных и глобальных процессов в биосфере на статическом уровне как экосистеме высшего уровня целесообразно оценивать в рамках трех системных уровней: статическом (пассивные или активные воздействия человека и общества на окружающую среду), геодинамическом (оценка глубинных сил и процессов, возникающих в результате глобальной эволюции Земли) и системно-прогностическим (прогноз на основе многофакторного анализа критериев и параметров всех блоков экосистемы).

Живое вещество биосферы

Формируя учение о биосфере как области пространства жизни, включающей наряду с организмами и среду их обитания, В.И. Вернадский ввел новое понятие – “живое вещество”. Сущность термина “живое вещество” детально была рассмотрена В.И. Вернадским в 1930 г. в статье “Общие соображения по изучению живого вещества”.

Первоначально В.И. Вернадский определил “живое вещество” следующим образом: “Под именем живого вещества я буду подразумевать всю совокупность организмов, растительных и животных, в том числе и человека” (Вернадский, 1940). В последующих работах он неоднократно возвращался к этому определению, дополняя и уточняя его. Главными из этих уточнений были его суждения о трансформации различных форм энергии, их роли в функционировании “живого вещества” и в истории химических элементов на Земле.

Живое вещество как совокупность организмов биосферы гетерогенно, пластично, возобновляемо, целостно, организовано, осуществляет вечное движение атомов химических элементов, трансформирует энергию, формируя и сохраняя соответствующую среду. Оно обладает конкретным химическим элементным составом, массой, энергией и функциями. Живое вещество мозаично, “всюдно” (Вернадский, 1980, с. 30). Для него характерны гомеостаз за счет биоразнообразия, многочисленных связей между отдельными организмами и уникальное свойство – адаптация. Оно обладает огромной свободной энергией и быстротечными биохимическими реакциями. Эта биохимическая энергия пронизывает всю биосферу.

Концепция “живого вещества” как ключевого понятия учения о биосфере формировалась В.И. Вернадским в период с 1916 по 1919 гг. (Вернадский, 1960). В статье “Химический состав живого вещества в связи с химией земной коры” В.И. Вернадский писал: “В геохимии мы не можем обойтись без изучения живых организмов, явлений жизни. Но эти организмы проявляются для нас совсем не в тех формах, в каких они рисуются биологам. Геохимик должен свести организмы к тем формам нахождения химических элементов, с которыми он имеет дело в минеральном царстве; для него организм проявляется своим химическим составом, своим весом, своей энергией. Морфологическая его структура, внутренние процессы, идущие внутри организма, отходят на второй план, хотя отнюдь не являются, как мы это увидим, безразличными” (Вернадский, 1922).

Концепция живого вещества является центральной в учении о биосфере. Ее универсальность связана как с глобальной организацией нашей планеты, так и с уникальным свойством биосферы — всепроникающей и организованной жизнью. За 100-летний период понятие живого вещества биосферы от абстрактно-философского значения наполнилось конкретным содержанием об особенностях комплекса организмов, населяющих планету, их связях и функциях (Ермаков, Ковальский, 2018; Янин, 2022).

Основные свойства живого вещества: единство химического состава, дискретность и целостность, организованность, обмен веществ и энергии, самовоспроизведение, наследственность, изменчивость, рост и развитие, раздражимость и движение (Ермаков, Ковальский, 2018).

Масса живого вещества, изменяется от 1.13×10^{12} до 10^{14} т. Различия оценок, по-видимому, обусловлены не только особенностями в методах расчета, но и эволюцией таксонов биосферы. При этом не менее трети всей массы биоты составляет микробная биомасса океана (Ермаков, 2018). Для суши, вероятно, микробная биомасса сравнима с таковой растений. При этом она включает не только бактерии на суше, симбиотические бактерии в эукариотических организмах, бактерии в почвах, нанопланктон и другие бактерии океана, но и прокариотическую биоту (эубактерии и археи) экстремальных биотопов (Заварзин, 2003; Добрецов, 2005).

Живое вещество океана дискретно не только на суше, но и в Мировом океане. Поверхностная и донная границы являются, по выражению В.И. Вернадского, “пленками жизни”, в прибрежных же районах выделяются “сгущения жизни”, поражающие воображение своим богатством и разнообразием. В настоящее время установлены скопления живого вещества не только над курильщиками, но и в толще океана на глуби-

не 2000 и 4000 м. По типам местообитаний различают пелагические организмы, населяющие толщу воды, и организмы, населяющие дно. Слой океана в 100–150 м является фотосинтетическим. Суммарная первичная продукция океана оценивается в 10^{11} С т/год (Романкевич, Ветров, 2021). Океан отличается сложностью трофических связей и биоразнообразием. Животный мир Океана еще более разнообразен по сравнению с континентами. В Океане обитает 150 тысяч видов животных и 10 тысяч водорослей, а общий объем биомассы оценивается в 35 миллиардов тонн. (Верещака, 2003; Vereshchaka et al., 2021).

Масса живого вещества — индикатор эволюции биосферы и усиливающегося антропогенного влияния. Поэтому ее более точное определение — одна из задач современной науки. По-видимому, возможно развитие методов учета живого вещества биосферы на основании энергетических, изотопных характеристик и газового баланса. Но это задача будущего.

Прошло более 100 лет, когда В.И. Вернадский ввел понятие “живое вещество” вначале в геологические науки, а затем в естествознание, в целом. Это позволило соединить воедино все оболочки Земли, выделив биосферу как основной носитель живого вещества и по-новому осветить процессы, происходящие на нашей планете. При этом в глобальном смысле живое вещество рассматривается как совокупность организмов биосферы. А в локальном аспекте живое вещество представляет собой дифференцированный арсенал организмов, функционирующих вместе, но состоящий из царств, сообществ, популяций и видов.

Роль живого вещества, обладающего конкретным химическим составом и специфическими функциями, в рассеивании и концентрировании химических элементов и их соединений в биосфере отражена в понятиях биогеохимическая энергия организмов и биогенная миграция (Вернадский, 1940).

Биогенная миграция химических элементов

Центральное место в учении о биосфере принадлежит понятию “биогенная миграция”. Роль “живых организмов” В.И. Вернадский ставит на первое место при изучении биогенной миграции вещества. Однако, в последующем, в особенности в западных странах Европы огромную роль стали придавать неживому (ископаемому веществу, то есть отмершим организмам) (Treatise, 2004). В России это направление исследований развивается профессором С.А. Остроумовым (2010) и А.С. Керженцевым (2006).

Биогенная миграция — это движение, концентрирование и рассеяние химических элементов и

их соединений в результате жизнедеятельности организмов: метаболических процессов, роста и размножения. При этом В.И. Вернадский дифференцировал биогенную миграцию атомов 1-го рода для прокариот, биогенную миграцию атомов 2-го рода для эукариот, миграцию атомов 3-го рода для человека.

В.И. Вернадский придает исключительно важное значение взаимодействию гетерогенного живого вещества, способного к воспроизведению, регуляции, сохранению информации и трансформации энергии, и биосферы как среды обитания организмов (планетной экосистемы), о чем свидетельствует нижеприведенная схема (Вернадский, 1980) (рис. 1).

Это взаимодействие осуществляется через биогенную миграцию химических элементов (биогеохимические циклы), трансформацию вещества и энергии. При этом все живое вещество Земли организовано и физико-химически едино: “Все живое происходит из живого в биосфере, комплекс физико-химических явлений в которой точно ограничен и определен” (Вернадский, 1980; с. 279), а “биогенная миграция химических элементов в биосфере стремится к максимальному своему проявлению” (1-й биогеохимический принцип) (Вернадский, 1960; с. 244). Далее В.И. Вернадский утверждает: “эволюция видов, приводящая к созданию форм жизни, устойчивых в биосфере, должна идти в направлении, увеличивающем проявление биогенной миграции атомов в биосфере” (2-й биогеохимический принцип) (Вернадский, 1980; с. 260); “живое вещество находится в непрерывном химическом обмене с космической средой, его окружающей, ... живое вещество создается и поддерживается на нашей планете космической энергией Солнца” (3-й биогеохимический принцип) (Вернадский, 1980; с. 260). Эта концепция позднее получила название закона единства организм—среда: “жизнь развивается в результате постоянного обмена веществом и информацией на базе потока энергии в совокупном единстве среды и населяющих ее организмов” (Вернадский, 1980; с. 19). В этом системном блоке действует принцип экологического соответствия: форма существования организма (включая его генетические особенности) всегда соответствует условиям жизни.

Химический элементный состав организмов и его экологическое значение

Изучение химического элементного состава живого вещества, начатое в организованной В.И. Вернадским лаборатории биогеохимии (БИОГЕЛ), вскоре охватило заметную часть научных лабораторий мира, как внутри страны, так и за рубежом. Широко известны работы А.П. Виноградова (2001) по химическому элементному составу организмов моря, обобщения В.А. Ковды (1985) по особенностям состава растений суши и почвенного покрова и многие другие. Последующая систематизация фактических данных позволила сформировать представления о значении элементного состава как систематического признака организмов, концепцию биогеохимических провинций (Виноградов, 1938, 1963) и новое экологическое направление — геохимическую экологию (Ковальский, 1974). Работы в этом направлении дали возможность открыть биологические функции отдельных макро- и микроэлементов, разработать мероприятия по профилактике микроэлементозов и биогеохимические методы поисков на основании данных по биогеохимической индикации аномалий.

Биогеохимическая индикация аномалий — это выявление аномальных таксонов биосферы, характеризующихся резко повышенным или пониженным уровнем содержания химических элементов и их соединений в среде и организмах. Это рудные аномалии, аномалии миграции химических элементов в ландшафтах, техногенные аномалии. Теоретически выделение аномалий основано на принципе: все изменения, происходящие в биосфере, отражаются на изменении свойств и состава живого вещества (Ермаков, 1999). В этом проявляется еще одно свойство живого вещества — *информационное единство и его емкость*.

В частности, в настоящее время развивается индикация микроэлементозов животных и человека по химическому элементному составу органов и тканей, например, по элементному составу волосного покрова (Тютиков, Ермаков, 2015) (табл. 1).

В целом, *химический элементный состав живого вещества является мерой биогенной миграции химических элементов*. При этом первоначальные представления об интенсивности вовлечения в

Совокупности организмов (живое вещество), для каждой морфологической формы, обладающие постоянным (в пределах определенных колебаний): объемом, массой, химическим составом, термодинамическими и фазовыми полями

→ *Среда в состоянии организованности, т.е. биосфера — организованная*
← *определенная оболочка земной коры, сопряженная с жизнью*

Рис. 1. Взаимодействие среда—организм по В.И. Вернадскому (1980, с. 19).

Таблица 1. Эффективность индикации микроэлементов животных по химическому элементному составу волосяного покрова крупного рогатого скота* (Тютиков, Ермаков, 2015)

Микро-элемент	Оценка микроэлементозов			
	Избыток		Дефицит	
	корма*	волосы	растения**	волосы
Fe	>200	>100	<20	<30
Mn	>100	>20	<20	<5
Zn	>100	>150	<20	<50
Sr	>100	>20	нд	нд
Cu	>80	>10	<5	<5
Mo	>3	>0.5	<0.2	<0.1
Co	>2	>0.1	<0.2	<0.05
Ni	>3	>2	нд	нд
Pb	>5	>1	нд	нд
Cd	>0.4	>1	нд	нд
Hg	>0.1	>0.5	нд	нд
Se	>1	>2	<0.05	нд
As	>1	>2	нд	нд
I	>5	>1	<0.1	<0.2

* Согласно МДУ (1987), ** в соответствии с критериями (1994), нд – нет данных.

биогенную миграцию тех или иных химических элементов можно получить при сравнении концентрационных характеристик организмов и земной коры (Ермаков, Тютиков, 2008).

Следует отметить новый этап в развитии учения о микроэлементах. Кроме специфического участия микроэлементов в определенных реакциях обмена веществ, в настоящее время особую роль придают их метаболическим взаимодействиям. Последние наблюдаются как в процессе образования и трансформации планетного вещества, в эпигенетических и гипергенных процессах (миграция и дифференциация вещества), так и в биогеохимических процессах (аккумуляция и рассеяние химических элементов организмов). Конкурентные и синергические связи между макро- и микроэлементами (Ca–P, Ca–Sr, Fe–Mn, Fe–Zn, P–Se, Ca–Zn, I–Se, U–Se, Cu–Se, Zn–Cd, Cu–Mo, Mo–W) выявлены на стадии всасывания, на фазе проникновения через мембраны, на молекулярном и генетическом уровнях (Anke, 2004). По-видимому, эти связи формировались в длительном геологическом времени наряду с эволюцией организмов. Последняя совершалась адекватно изменению среды их обитания.

Так, при Мо токсикозах животных отмечен антагонизм Мо, Cu и S (сульфатами) (Kovalskij, 1977). Антагонизм наиболее четко проявляется в

районах с заметным преобладанием Cu над Мо в рационе животных. В бассейне р. Баксан такое взаимодействие также имеет место в наиболее обогащенных металлами рудных и примыкающих к ним территориях (Тырныауз, Былым). Но в данном субрегионе биосферы в почвах и растениях наблюдается повышенное содержание W. Этот микроэлемент присутствует не только в растениях, но и в жидкостях и тканях животных. Наряду с Мо, Cu, Fe W обнаруживается во фракциях ксантинооксидазы молока крупного рогатого скота, а в опытах *in vitro* ионы W ингибируют активность фермента (Ермаков и др., 2020). Результаты исследований согласуются с существующими данными по влиянию W на развитие Мо токсикоза в экспериментах на животных (Pan, 1986). Полагают, что в ходе эволюции жизненных форм возрастание значения молибдена и снижение важности вольфрама происходило вследствие специфики физико-химических свойств этих элементов и смены условий среды обитания организмов (Заварзин, 2003; Федонкин, 2008).

Биогеохимическое районирование

Идея биогеохимической гетерогенности химического элементного состава живого вещества и зональности континентов послужила основой биогеохимического районирования территории СССР В.В. Ковальским (1974). В настоящее время биогеохимическое районирование таксонов биосферы является одним из важных элементов системы современного экологического мониторинга.

Мозаичность таксонов биосферы связана не только с геологическими факторами эволюции нашей планеты, но и с их относительно динамическим состоянием. Процессы выветривания пород, массоперенос вещества и его трансформация происходят постоянно. Но с появлением человека в биосфере появляется мощная антропогенная составляющая, усиливающая преобразование биосферы в целом. Поэтому изучение роли техногенных факторов на фоне относительно природных процессов трансформации вещества и реакций организмов становится одной из главных задач биогеохимии. В этом направлении представляют интерес работы Е.М. Коробовой и коллег (2020) по комплексной оценке относительно природных и техногенных потоков микроэлементов и радионуклидов. Экологические катастрофы на атомных электростанциях (Чернобыль, Фукусима) активировали оценку миграции радионуклидов в окружающей среде, создание специальных ГИС, систем отслеживания и мониторинга, а также создание теории поведения радионуклидов (концепция паттернов) (Линник, 2018).

Биогеохимическое районирование таксонов биосферы является одним из важных элементов

системы современного экологического мониторинга. Тем не менее, в настоящее время накопилось много данных о районировании отдельных территорий России и карта биогеохимического районирования, предложенная В.В. Ковальским (1974), требует уточнения.

Из других научных концепций В.И. Вернадского следует отметить его идеи о вечности жизни, организованности биосферы и космизме, проблему биолитов, рассмотренные в работах (Шипунов, 1980; Юшкин, 2008; Аксенов, 2022).

Связь биогеохимии с другими науками

Интенсивное развитие биогеохимии в мире явилось результатом дифференциации этой науки и возникновению новых направлений (рис. 2).

В современных условиях техногенеза биосферы роль биогеохимии резко возрастает. В настоящее время формируется новое научное направление — биогеохимия ноосферы. Предметом ее исследований становятся техногенно преобразованные таксоны биосферы, их эволюция и пути оптимального взаимодействия человека и природы. Полагают, что техногенная составляющая биогеохимических циклов не должна превышать природные потоки вещества (Коробова, 2020). Методические аспекты оценки техногенной и относительно природной составляющей локальных биогеохимических циклов отражена в работе Н.С. Касимова (2013).

Развитие биогеохимии тесно связано с достижениями в других областях знания (рис. 2). Прежде всего, новые знания в биогеохимии определяются развитием аналитической химии, разработкой и применением новых методов анализа вещества.

Биогеохимия широко использует методы биохимии в области изучения микроэлементозов, оценки эволюционных процессов, особенностей

пищевых цепей. Биохимия, в свою очередь, использует знания биогеохимии при исследовании минерального обмена, биологической роли микроэлементов, связи организмов с геохимической средой. Тесно к этому взаимодействию наук примыкает физиология микроорганизмов, растений, животных и человека. Это и нейро-гуморальная регуляция жизненных процессов, гормональный статус, процессы адаптации и взаимодействия различных факторов среды и организма.

Невозможно представить биогеохимию без элементов микробиологии. Азотфиксация, нитрификация, хемосинтез, сульфат-редукция, трансформация соединений железа и марганца осуществляются с помощью микроорганизмов. Они являются двигателями глобальных биогеохимических циклов углерода, азота, фосфора и других химических элементов. К этому взаимодействию тесно примыкает почвоведение, образуя новое биологическое направление — биогеохимию почв.

Существенная роль принадлежит биогеохимическим факторам в регуляции генетических процессов при взаимодействии организмов с геохимической средой. Успехи молекулярной биологии и генетики активируют процессы познания биологической роли химических элементов и их соединений.

Биогеохимия использует методы современной информатики. Особенно это касается применения компьютерных систем для оценки биогеохимических и других процессов в динамике. Это достижение разумного человека можно рассматривать как ноосферное, если оно служит целям развития и сохранения цивилизации (Sarian et al., 2020).

Наконец, биогеохимия и экология пронизывают друг друга. Оба научных направления представляют собой системы знаний о взаимосвязи и взаимодействии организмов и среды обитания. В биогеохимии это взаимодействие выражается че-

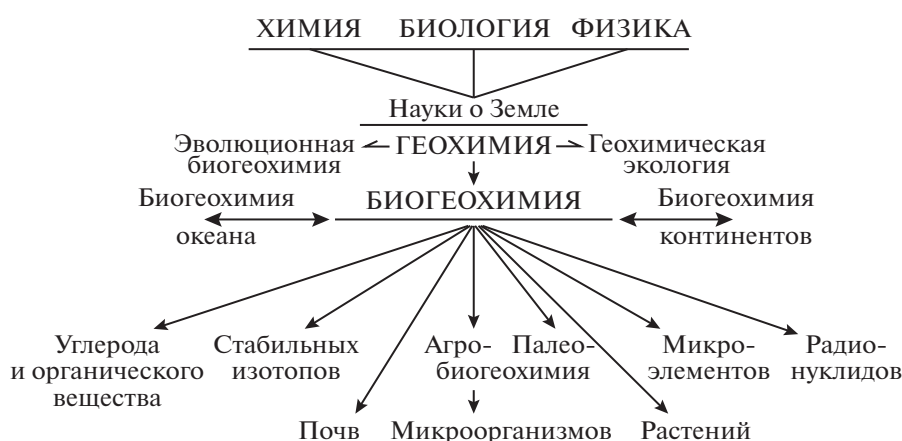


Рис. 2. Основные направления биогеохимии.

рез биогенную миграцию атомов химических элементов и их соединений, а в экологии — в более широком русле через пищевые цепи, энергетические процессы, организменные связи, включая духовные и эстетические факторы для человека. Обе науки взаимно дополняют друг друга.

Биогеохимия имеет ряд тождественных с общей экологией признаков. Взаимодействие организмов с геохимической средой, зависимость их химического состава от состава среды, придают биогеохимии экологическую направленность. Особенно это касается биогеохимических циклов, рассматриваемых общей экологией (Добровольский, 2007). Тем не менее, отождествлять биогеохимию с экологией невозможно, так как они отличаются предметом, объектами исследований, общей методологией и изучаемыми процессами. Вопросы эволюции элементного состава живого вещества, генезиса биолитов и месторождений, фракционирования изотопов, процессы и механизмы обмена веществом в системных блоках: атмосфера-литосфера (океан), биогеохимическое районирование таксонов биосферы и ряд других решаются в рамках биогеохимии.

Экологические аспекты биогеохимии наиболее полно воплощены в концепции биогеохимических провинций (Виноградов, 1963) и геохимической экологии (Ковальский, 1974). Большой вклад в развитие биогеохимии внесли также В.А. Ковда (1985), Н.Г. Зырин (1977), А.И. Перельман (1980), Ю.Е. Саэт (1990), А.Ю. Леин (2004), Е.А. Романкевич и А.А. Ветров (2021), E.T. Degens (2012) и M. Anke (2004), G.E. Hutchinson (1978), A. Kabata-Pendias (1999), V.N. Bashkin and R. Howarth (2014).

Концентрационная функция живого вещества и ее использование в биотехнологии

Существует тесная связь между биогеохимией и биотехнологией. Уже в ранних работах В.И. Вернадского по биогеохимии он дифференцирует организмы по их преобладающему концентрированию определенных химических элементов (кремниевые, алюминийевые, железные, калийевые и т.п.) (Вернадский, 1940).

Концентрационная функция живого вещества является одной из центральных биосферных проблем. Она связана с синтетической и жизнеобеспечивающей деятельностью организмов. Ярким примером такой активности являются фото- и хемосинтез. Синтетическая и концентрационная функции организмов контролируются генетически и являются специфическими для отдельных организмов. Концентрирование макроэлементов общеизвестно для организмов-концентраторов Ca, Mg, Sr, Si, Na, K, Fe, S, что сопровождается образованием биолитов. Метаболические меха-

низмы концентрирования микроэлементов связаны с физиологическими процессами регуляции их аккумуляции и всасывания, контролируемые ионными каналами, конкурентными взаимодействиями и определенными генами. Систематизация фактов о концентрировании определенных химических элементов организмами принадлежит В.И. Вернадскому (1940) и А.П. Виноградову (1963). В настоящее время это направление развивается многими учеными и коллективами. Живое вещество состоит в основном из легких атомов химических элементов, что связано с планетарной историей. Нам известны многие организмы, концентрирующие микроэлементы. Эта функция является основой ряда современных биотехнологий. В частности, установлено специфическое аккумуляции некоторых редких элементов микроорганизмами, высшими грибами и растениями, что может быть положено в основу создания новых эффективных препаратов для коррекции дефицита микроэлементов и извлечения редких элементов из природного сырья (Градова и др., 2020).

Важная роль в концентрировании микроэлементов принадлежит почвенным микроорганизмам (табл. 2). Для них характерно высокое значение коэффициента биологического поглощения (К_б), достигающее для сурьмы 73 единиц.

Так, при максимальном содержании ртути в почвах концентрации ее в злаках и биомассе почвенной микрофлоры снижаются. Биомасса злаков при высоких концентрациях ртути в почвах уменьшается более заметно, чем биомасса почвенной микрофлоры (рис. 3). При этом установлена прямая положительная корреляция между уровнем содержания металла в почвах и его концентрацией в сухой биомассе микроорганизмов ($r = +0.827$), что важно при разработке технологий ремедиации почв, загрязненных ртутью (Данилова и др., 2008).

Используя методы генетики и геохимической экологии, биотехнологами получены эффективные препараты, содержащие микроэлементы — йод, селен, кобальт, железо, молибден, применяемые для коррекции микроэлементозов животных и человека. Кроме того, известны биотехнологические методы утилизации углекислого газа и биодеградации углеводов.

Экспериментально показано, что при применении азотобактерина — внесение в молибден-недостаточную дерново-подзолистую почву молибдата натрия в концентрации 5 и 10 мг/кг содержание азота в почве повышалось, соответственно на 17 и 25% (Градова, 2020).

Внесение в почву железа в течение 28 дней в форме бактериального препарата приводило к снижению углеводов в почве на 33% по сравнению с контролем. Таким образом, показано, что функциональная активность микробных пре-

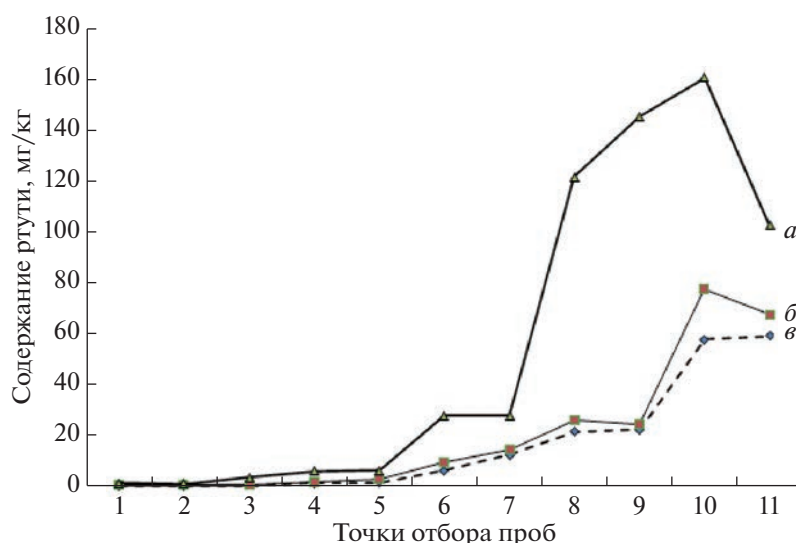


Рис. 3. Сравнительное аккумулятивное поведение ртути почвенной микрофлорой (а) и растениями (б) из почвенной среды на основе почв рудника Чауйвай (Кыргызстан) (в) (Данилова и др., 2008). Максимальная концентрация ртути в почвах 56.7 мг/кг.

паратов зависит от использования их биогеохимического потенциала, который может быть лимитирован отсутствием значимых микроэлементов (Градова и др., 2020).

Следует отметить высокую аккумулятивную способность некоторых растений накапливать не только микро-, но и ультрамикроэлементы. Например, в пределах бывшего Жирекенского ГОКа растения содержали рений не в нг/кг, а в мг/кг, то есть выше фоновых концентраций в 10^5 – 10^6 раз. Известно, что рений тяготеет к Мо–Cu рудопроявлениям и при выветривании умеренно мигри-

рует с водами и почвенными растворами, накапливаясь в растениях. Не образуя рений-органических соединений в растениях, по-видимому, Re в форме перрената частично восстанавливается, являясь акцептором электронов в быстро протекаемых окислительно-восстановительных реакциях. Кроме того, включение рения в фермент ксантиноксидазу указывает на его важные биологические функции (Ермаков и др., 2018).

Особую группу концентраторов микроэлементов представляют организмы гидротерм (Демина, Галкин, 2013). Так, для термофильных полихет

Таблица 2. Параметры аккумулятивного поведения микроэлементов почвенными микроорганизмами (Ермаков, Тютюков, 2008)

Микроэлемент	r почва–биомасса	Аккумулятивно*, г	% от общего содержания	Кб
Cu	+0.89	9–2100	0.001–0.165	0.5–2.10
Zn	+0.92	8–5412	0.001–0.376	0.28–4.56
Pb	нд	52–9350	0.0018–0.278	0.29–3.33
Hg	+0.83	0.09–60.0	0.0004–0.83	0.26–36.64
Sb	+0.81	1–990	0.0004–2.61	0.40–73.19
As	+0.64	0.35–119.5	0.00015–0.064	0.16–2.07
Ni	нд	17–853	0.0055–1.615	нд
Co	нд	6.2–152	0.057–0.219	нд
Mn	нд	117–7760	0.0018–0.449	1.49–4.32
Mo	нд	нд	нд	3.22–13.66
W	нд	нд	нд	0.11–1.43
Re	нд	нд	нд	5.32

Примечания. r – коэффициент корреляции; * количество металлов, захватываемое почвенной микрофлорой, (для почвенного монолита площадью 1 га и высотой 20 см); нд – нет данных.

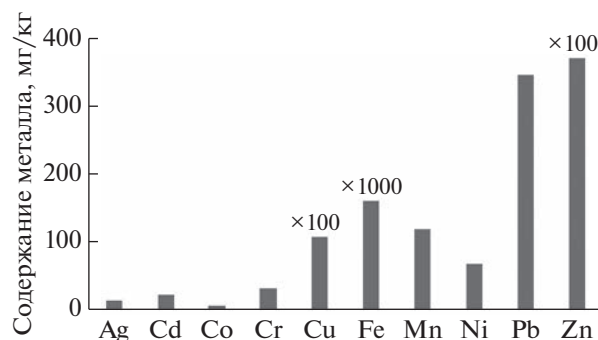


Рис. 4. Содержание металлов в трубках полихет *Alvinella pompejana*, в мг/кг сухого вещества. По материалам Л.Л. Деминой и С.В. Галкина (2013).

Alvinella pompejana, обитающих в зоне непосредственного влияния флюидов океанических гидротерм, характерно уникальное свойство накапливать металлы (рис. 4). Нетрудно заметить, что полихеты наиболее интенсивно аккумулируют железо, цинк и медь.

Это явление связано с высокими концентрациями металлов в горячей воде биотопа альвинеллид и специфическим улавливанием микроминералов (пирита, халькопирита, сфалерита, вюртцита) в бактериальной слизи полихет, покрывающих их тело. При этом концентрации мышьяка и селена в трубках достигали 9.5 и 1.7 мг/кг, соответственно.

Таким образом, развитие проблемы концентрирования микроэлементов организмами дает не только новые знания о механизмах концентрирования химических элементов, особенностях их обмена и влиянии на физиологические процессы, но и служит созданию новых технологий в экологии, микробиологии, растениеводстве, медицине и ветеринарии.

Успехи биогеохимии и существующие проблемы

Успехи развития биогеохимических идей В.И. Вернадского за 100-летний период ее создания очевидны. Из достижений континентальной биогеохимии следует отметить: внедрение системного подхода в изучение локальных и глобальных циклов химических элементов; формирование и развитие новой ветви биогеохимии и экологии — геохимической экологии; разработку биогеохимического метода поисков полезных ископаемых; формирование и развитие радиобиогеохимии; разработку новых биогеохимических технологий извлечения редких химических элементов и формирование инженерной биогеохимии; районирование таксонов биосферы; экологическую оценку территорий с использованием биогеохимических критериев; биогеохимическую индикацию микроэлементозов и ряд других.

При оценке геохимической роли живого вещества в природно-техногенных процессах успешно используются информация о содержании и соотношении стабильных изотопов химических элементов, особенно углерода и кислорода в биогеохимической пищевой цепи. В настоящее время методы изотопной биогеохимии широко применяются в экологических, клинических и токсикологических исследованиях. Стабильные изотопы углерода ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) и серы ($^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$) применяют как маркеры для определения биологического возраста человека и степени загрязнения окружающей среды. Полученные данные используются для дифференциации путей миграции природных и техногенных источников серы, для оценки пищевых цепей морских организмов (по соотношению изотопов азота), для генезиса месторождений нефти и для решения других фундаментальных, народно-хозяйственных и экологических задач (Галимов, 1981).

Заметное развитие получило учение о биолитах. В.И. Вернадский (1922) придавал особое значение биогенезу минералов. Он классифицировал большинство природных соединений на 14 групп, где наряду с неорганическими кристаллами выделил специальные группы “органических соединений” и “солей органических кислот”. Несмотря на то, что в последующем он непосредственно не занимался вопросами минералообразования, но постоянно поддерживал это научное направление. Более широко и глубоко биогенные минералы были изучены учеником и сотрудником В.И. Вернадского Я.В. Самойловым (1921). Я.В. Самойлов разработал концепции биолитов и палеобиогеохимии. Дальнейшее развитие идеи В.И. Вернадского о биогенном минералообразовании получили в трудах академика Б.Б. Полюнова и его школы, ряда почвоведов и геохимиков. В настоящее время это научное направление активно развивается. Установлено образование биоминералов не только в осадочных отложениях, но также в листьях растений и тканях млекопитающих. Организмы продуцируют карбонат, фосфат, оксалат, диоксид кремния, оксид/гидроксид железа или серосодержащие минералы, иллюстрирующие замечательный спектр химических реакций и механизмов биоминерализации (Леин, 2008; Юшкин, 2008; Skinner, Ehrlich, 2014). Исследования в области биоминералогии играют ключевую роль в исследовании эволюции минерального мира и развитии палеобиогеохимии. При этом математическое моделирование структур позволяет не только объяснить полученные экспериментаторами результаты, но и предсказывать новые направления исследований, что особенно четко показано в работах по современной кристаллохимии (Oganov, 2011).

Роль биогеохимии в естествознании связана, прежде всего, с внедрением системного подхода в

изучении природных процессов. Этот принцип был присущ российским ученым-натуралистам конца 19 и начала 20 века, но его реализация активировалась работами В.И. Вернадского и его последователей. Именно принцип системности (организованности) экосистем различного уровня — характерные признаки современного естествознания. Следуя лучшим традициям развития естествознания, В.И. Вернадский, а в последующем В.В. Ковальский и другие ученые пришли к необходимости развития системного метода исследований. В.В. Ковальский впервые ввел понятие биогеохимических пищевых цепей, которые в отличие от трофических, содержат одно из начальных абиотических звеньев миграции элементов — горные породы (Ковальский, 1974). Именно биогеохимические подходы способствуют выработке взвешенных решений при внедрении пищевых добавок и препаратов, содержащих микроэлементы.

При изучении биогеохимических процессов и явлений важно выяснить причинно-соединенную связь между геохимическим фактором и биологической реакцией организмов. Формальный подход наличия коррелятивных связей может привести к неверной оценке роли геохимического фактора в развитии того или иного патологического процесса. Это прежде всего касается биогеохимических провинций и эндемий. Так, при избытке молибдена в среде в горных районах Кабардино-Балкарии не выявлено эндемической “молибденовой подагры” (Ермаков и др., 2018a; Ermakov et al., 2021). В районах Северной Осетии при локальном избытке свинца в почвах и растениях явных признаков свинцового токсикоза у сельскохозяйственных животных не наблюдается, несмотря на снижение активности ацетилхолинэстеразы и дегидратазы δ -аминолевулиновой кислоты. В первом случае, по-видимому, действие избытка молибдена блокируется избытком вольфрама (Josbi et al., 2003), а во втором — сульфиды свинца слабо окисляются во внешней среде и плохо усваиваются организмами (Ермаков, 2021). При изучении геохимических причин урсовой Кашина-Бека болезни большинство ученых пытается найти ключевые факторы ее возникновения. Однако при данной патологии геохимические факторы могут быть косвенными, а главными — предшествующие патологии, гормональный дисбаланс и генетические факторы (Ермаков, 2023).

Необходимо обратить внимание на проблему загрязнения среды “тяжелыми” металлами. Под этим термином в основном понимают высокие концентрации в почвенно-растительном комплексе Cu, Zn, Pb и Cd. Однако загрязнение металлами имеет в основном локальный характер, а биогеохимическое опробование больших площа-

дей условно фоновых территорий в ряде случаев не подтверждает глобальный характер загрязнения. Напротив, выявляется недостаток биологически активных микроэлементов (Cu, Zn, Co, Mo) (Сысо, 2016).

К проблеме загрязнения окружающей среды имеет прямое отношение создание карт и схем, отображающих определенное значение различных факторов (геохимических, биологических и др.). Они имеют ограниченное применение во-времени. По-видимому, для реальной оценки событий необходимо иметь гиперсвязанную информационную систему, отражающую в динамике любые изменения в среде обитания и обществе (Sarian et al., 2020).

Несмотря на развитие биогеохимии, существует масса проблем в этой области, требующих решения в ближайшем будущем. Основные из них следующие: недостаточно развита теоретическая база биогеохимии. Нет концепции баланса обмена веществом в резервуарах биосферы, включая систему биосфера — космос; живое вещество биосферы нуждается в учете (инвентаризации); биогеохимические процессы оцениваются в основном статически, слабо развиваются динамические подходы и согласованность процессов и свойств объектов.

Биогеохимия проникает в тайны познания генезиса жизни, но очень далека от ее разгадки. В.И. Вернадский часто упоминал понятия абиогенеза и биогенеза, но соглашался с принципом Франческо Реди (1626—1697): все живое происходит от живого. В последующем рассматривалась концепция коацерватов, предложенная Н.И. Опаринным (1968). В современный период при рассмотрении происхождения жизни следует отметить концепцию Э.М. Галимова (1998) о роли АТФ в возникновении начальных форм жизни и Н.Л. Добрецова (2005) — о роли мира РНК на ранних стадиях эволюции. Представляет интерес проблема образования нуклеотидов и их полимеризация в связи с возможностью сборки вирусной РНК из ее фрагментов у насекомых (Ермакова, Тарасевич, 1968) и растений (Никитин и др., 2014), а также существование транспозонов (Хесин, 1985). Остается неясным роль липидов как энергетического материала, а также значение взаимодействия мономеров, олигомеров и полимеров кремниевой кислоты с макрокомпонентами живого вещества.

Одной из важных сторон биогеохимии является выяснение природы биогеохимических эндемий как экстремальных проявлений геохимических факторов среды. Однако причины ряда микроэлементозов, как уже отмечалось выше, недостаточно выяснены.

Актуальны сегодня и другие проблемы биогеохимии, такие как роль взаимодействий макро- и

микроэлементов в организмах; аэрогенная миграция микроэлементов и других веществ с аэрозолями и наночастицами и их влияние на жизнедеятельность организмов; связь биогеохимических факторов с проявлениями инфекционных болезней, включая вирусные пандемии, применение инфокоммуникационных средств для оценки и регулирования биогенной миграции химических элементов.

Непреодолимой задачей современного развития биогеохимии является также формирование техногенной биогеохимии и установление закономерностей миграции и трансформации техногенных потоков химических элементов. И в этом направлении предстоит многое осмыслить и сделать.

Следует также отметить актуальность развития биогеохимии ноосферы как сферы активности разумного человека. “... *Ноосфера есть новое геологическое явление на нашей планете. В ней впервые человек становится крупнейшей геологической силой. Он может и должен перестраивать своим трудом и мыслью область своей жизни...*”. (Вернадский, 1980; с. 218–219). Однако концепция ноосферы находится в стадии разработки и некоторые ее положения противоречивы (Живетин, 2008).

Ноосферу можно рассматривать как идеальное состояние биосферы при оптимальном взаимодействии природы и человека, когда благоразумная деятельность человека становится определяющим фактором эволюции планеты. При этом биосфера не исчезает, она переходит в нообиосферу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предвидение В.И. Вернадского о возрастающей роли биогеохимии в современном обществе сбывается. Биогеохимия является системной наукой и проникает в различные области знания, освещая проблемы генезиса жизни, взаимосвязи организмов и их сообществ со средой обитания, планетарную роль живого вещества, включая техногенную деятельность человека и ее последствия. Биогеохимия вносит весомый вклад в приближение к целям устойчивого использования природных ресурсов, к целям предотвращения глобальных изменений.

За столетний период своего развития биогеохимические знания были акцептированы экологий, геохимией и биотехнологией.

На основании данных о глобальных и локальных циклах, функциях биосферы, учения о биолитах заложена основа в биосферную направленность геохимии ландшафтов и почвоведения. Закономерности дифференциации живого вещества и его химического состава отражены в экологических науках, биохимии, физиологии и агрохимии.

Биогеохимия приобретает важное практическое значение. Результаты биогеохимических исследований используются в биотехнологии при разработке технологий извлечения редких элементов, ремедиации почв, получения биопрепаратов и лекарств с определенным содержанием микроэлементов, производстве микроудобрений. Развиваются биогеохимический инжиниринг, новые методы биогеохимической индикации экологического состояния территорий, внедряются IoT, новые ГИС и другие инфокоммуникационные системы, позволяющие отслеживать биогеохимические процессы в динамике.

Непреодолимая роль биогеохимии в оценке новых материалов и технологий для здоровья человека и животных, для целостности и организованности биосферы.

Тем не менее, актуальными вопросами остаются преподавание основ биогеохимии для подготовки специалистов различного профиля в высшей школе, восстановление “биогеохимии” как научной специальности. Знание теоретических основ биогеохимии необходимо для предотвращения экологически негативных последствий хозяйственной деятельности людей и нейтрализации уже возникших экологических обострений.

Время развития биогеохимии еще впереди. Прежде всего, это создание теории миграции вещества, развитие динамической биогеохимии, освещение проблем вечности жизни, организованности биосферы и космизма, выяснения оптимального соотношения биосферы и ноосферы, достойного места в ней разумного человека как основного признака ноосферы. “Мыслящий и работающий человек, — писал В.И. Вернадский, — есть мера всему. Он есть огромное планетное явление” (Вернадский, 1980; с. 89).

Авторы выражают благодарность научному редактору Т.М. Минкиной и рецензентам за ценные замечания при подготовке рукописи.

Работа выполнена по Государственному заданию ГЕОХИ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аксенов Г.П. (2022) В. И. Вернадский о времени существования биосферы. *Университет им. В.И. Вернадского*. № 3(85), 7–22.
<https://doi.org/10.17277/voprosy.2022.03.pp.007-022>
- Будыко М.И., Ронов А.Б., Яншин А.Л. (1985) *История атмосферы*. Л.: Гидрометеиздат, 208 с.
- Верещака А.Л. (2003) *Биология моря*. М.: Научный Мир, 192 с.
- Вернадский В.И. (1922) *Химический состав живого вещества в связи с химией земной коры*. Петроград: Время, 48 с.
- Вернадский В.И. (1926) *Биосфера*. I–II. Л. НХТИ, 146 с.

- Вернадский В.И. (1928) Эволюция видов и живое вещество. *Природа*. (3), 239-250.
- Вернадский В.И. (1930) Общие соображения по изучению живого вещества. *Труды Биогеохимической лаборатории*. 1, 5-32.
- Вернадский В.И. (1940) Биогеохимические очерки. М.-Л.: изд-во АН СССР, 250 с.
- Вернадский В.И. (1960) Избранные сочинения, 5. М.: изд-во АН СССР, 422 с.
- Вернадский В.И. (1980) Проблемы биогеохимии. *Труды Биогеохимической лаборатории*. 16, 320 с.
- Вернадский В.И. (2013) Записка президенту Академии Наук СССР академику В.Л. Комарову (28 сентября 1944 г.). *Собрание сочинений в 24 томах*. 24. М.: Наука, 347-349.
- Вернадский В.И. (2016) О биогеохимии. *Современные тенденции развития биогеохимии*. М.: ГЕОХИ РАН, 7-13.
- Виноградов А.П. (1938) Биогеохимические провинции и эндемии. *ДАН СССР*. 18(4-5), 283-286.
- Виноградов А.П. (1963) Биогеохимические провинции и их роль в органической эволюции. *Геохимия*. 3, 199-213.
- Виноградов А.П. (2001) Химический элементарный состав организмов моря / Отв. ред. Э.М. Галимов; [сост. Л.Д. Виноградова]. М.: Наука, 620 с.
- Галимов Э.М. (1981) Природа биологического фракционирования изотопов. М.: Наука, 247 с.
- Галимов Э.М. (отв. Ред.) (2008) Проблемы зарождения и эволюции биосферы. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 552 с.
- Градова Н.Б., Ермаков В.В., Гусева Т.В., Ковальский Ю.В., Панфилов В.И. (2020) Прикладные аспекты геохимической экологии микроорганизмов в решении задач экобиотехнологии. *Биотехнология*. 36(6), 107-114.
- Данилова В.Н., Хушвахтова С.Д., Ермаков В.В. (2008) Возможные пути распределения ртути в биосфере// *Проблемы биогеохимии и геохимической экологии*. 3(7), 135-139.
- Демина Л.Л., Галкин С.В. (2013) Биогеохимия микроэлементов в глубоководных гидротермальных экосистемах. М.: ГЕОС, 256 с.
- Добрецов Н.Л. (2005) О ранних стадиях зарождения и эволюции жизни. *Вестник ВОГиС*. 9(1), 43-54.
- Добровольский Г.В. (2007) К 80-летию выхода в свет книги В.И. Вернадского "Биосфера". Развитие некоторых важных разделов учения о биосфере. *Экологическая химия*. 16(3), 135-143.
- Докучаев В.В. (1994) Дороже золота русский чернозем. М.: Изд-во МГУ, 5-44.
- Ермаков В.В. (1999) Геохимическая экология как следствие системного изучения биосферы. *Труды Биогеохимической лаборатории*. 23. М.: Наука, 152-182.
- Ермаков В.В. (2016) 90 лет биогеохимии в России. *Современные тенденции развития биогеохимии*. М.: ГЕОХИ РАН, 34-58.
- Ермаков В.В. (2021) Нерешенные проблемы геохимической экологии. *Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы VI Международной конференции*. 2. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 41-46.
- Ермаков В.В. (2023) Биогеохимические эндемии с неясной этиологией: урвская (Кашина-Бека) болезнь. *Экологическая генетика и здоровье населения: достижения и перспективы: мат-лы Межд. науч.-практ. конф.* Алматы, С. 28-31. ISBN 978-601-04-6203-8
- Ермаков В.В., Ковальский Ю.В. (2018) Живое вещество биосферы: масса и химический элементный состав. *Геохимия*. (10), 931-944.
- Ermakov V.V., Kovalsky Yu.V. (2018) Living Matter of the Biosphere: Mass and Chemical Elemental Composition. *Geochem. Int.* 56(10), 969-981.
- Ермаков В.В., Пыцкий И.С., Данилова В.Н., Дегтярев А.П., Кречетова Е.В. (2018) Биогеохимические аномалии рения и методы их выявления. *Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. XIX Международная конференция*. М.: ИГЕМ РАН, 116-119.
- Ермаков В.В., Тютиков С.Ф. (2008) Геохимическая экология животных. М.: Наука, 312 с.
- Ермаков В.В., Тютиков С.Ф., Сафонов В.А. (2018а) Биогеохимическая индикация микроэлементозов. М.: издание РАН, 386 с.
- Ермаков В.В., Тютиков С.Ф., Дегтярев А.П., Данилова В.Н., Гуляева У.А., Догадкин Д.Н. (2020) Формирование биогеохимических аномалий в бассейне р. Баксан. *Геохимия*. 65(10), 955-968.
- Ermakov V.V., Tyutikov S.F., Safonov V.A., Danilova V.N., Gulyaeva U.A., Dogadkin D.N. (2020) Formation of Biogeochemical Anomalies in the Baksan River Basin. *Geochem. Int.* 58(10), 1097-1109.
- Ермакова Г.И., Тарасевич Л.М. (1968) Применения метода флюоресцирующих антител для обнаружения полиэдренного агента в яйцах (грене) тутового шелкопряда. *Вопросы вирусологии*. (1), 89-93.
- Живетин В.Б. (2008) Биосферный риски. Ижевск: ИИЦ "Бон Анца", 720 с.
- Заварзин Г.А. (2003) Лекции по природоведческой микробиологии. М.: Наука, 348 с.
- Зырин Н.Г., Обухов А.И. (1977) Спектральный анализ почв, растений и других биологических объектов. М.: Издательство МГУ, 334 с.
- Касимов Н.С. (2013) Экогеохимия ландшафтов. М.: ИП Филимонов М.В., 208 с.
- Керженцев А.С. (2006) Функциональная экология. М.: Наука, 259 с.
- Ковальский В.В. (1974) Геохимическая экология. М.: Наука, 300 с.
- Ковальский В.В. (1982) Геохимическая среда и жизнь. М.: Наука, 78 с.
- Ковальский В.В. (1991) Геохимическая среда, микроэлементы, реакции организмов. *Тр. Биогеохим. лаб.* 22. М.: Наука, 5-23.
- Ковда В.А. (1985) Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 265 с.
- Коробова Е.М. (2020) Эколого-геохимические проблемы современной ноосферы. М.: издание РАН, 122 с.
- Леин А.Ю. (2004) Аутигенное карбонатообразование в океане. *Литология и полезные ископаемые*. (1), 3-35.
- Линник В.Г. (2018) Ландшафтная дифференциация техногенных радионуклидов. М.: издание РАН, 372 с.

- Никитин Н.А., Трифонова Е.А., Петрова Е.К. и др. (2014) Изучение первых стадий сборки вириона у X-вируса картофеля. *Сельхоз. Биол.* (5), 28-34.
- Опарин А.И. (1968) Жизнь, её природа, происхождение и развитие. М.: Наука, 173 с.
- Остроумов С.А., Колесов Г.П. (2010) Редкие и рассеянные элементы в биогенном детрите: новая сторона роли организмов в биогенной миграции элементов. *Известия Самарского НЦ РАН.* **12**(1), 153-155.
- Перельман А.И. (1980) *Геохимия*. М.: Высшая школа, 245 с.
- Романкевич Е.А., Ветров А.А. (2021) Углерод в мировом океане. М.: ГЕОС, 352 с.
- Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др. (1990) Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 335 с.
- Самойлов Я.В. (1921) Биолиты как орудие постижения жизни прежних геологических эпох. *Природа.* (1/3), 26-43.
- Сысо А.И. (2016) Актуальные вопросы гигиенической и биогеохимической оценки качества почв и растительной продукции. *Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах* / под ред. В.А. Боева, А.И. Сысо, В.Ю. Хорошавина. Тюмень: изд-во Тюменского гос. ун-та, 132-142.
- Тютиков С.Ф., Ермаков В.В. (2015) Диагностика хронических микроэлементозов сельскохозяйственных парнокопытных по химическому составу волос. *Вестник с.-х. науки.* (5), 61-83.
- Федонкин М.А. (2008) Роль водорода и металлов в становлении и эволюции метаболических систем. *Проблемы зарождения и эволюции биосферы*. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 417-438.
- Хесин Р.Б. (1985) Непостоянство генома. М.: Наука, 472 с.
- Шипунов Ф.Я. (1980) Организованность биосферы. М.: Наука, 291 с.
- Юшкин Н.П. (2008) Эволюция минерального мира, зарождение биосферы и биоминеральная коэволюция. *Минералы и минералообразование*. Сыктывкар, 455-460.
- Янин Е.П. (2022) Основные положения учения академика В.И. Вернадского о живом веществе. *Из архивного наследия академика В.И. Вернадского. История и судьба сборника "Живое вещество"*. М.: НП "АПСО", 6-62. DOI
- Anke M. (2004) Essential and toxic effects of macro, trace, and ultratrace elements in the nutrition of animals. *Elements and their Compounds in the Environment*. **1**. Eds. By E. Merian, M. Anke, M. Ihnat, M. Stoepler. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, 305-341.
- Bashkin V.N., Howarth R. (2014) *Modern Biogeochemistry*. Springer Netherlands, 561 p.
- Degens E.T. (2012) *Perspectives on Biogeochemistry*. Berlin: Springer Science & Business Media, 427 p.
- Ermakov V., Safonov V., Dogadkin D. (2021) Characteristic features of molybdenum, copper, tungsten and rhenium accumulation in the environment. *Innov. Infrastruct. Solut.* **6**, 104.
<https://doi.org/10.1007/s41062-021-00481-5>
- Hutchinson G.E. (1978) *An introduction to population ecology*. New Haven and London: Yale University Press, 256 p.
- Josbi H.K., Cooney J.J., Incore F.E., Gruhn N.E., Lichtenberger D.L., Enemark J.H. (2003) Investigation of metal-dithiolate fold angle effects: implications for molybdenum and tungsten enzymes. *PNAS USA*. **100**(7), 3719-3724.
- Kabata-Pendias A., Pendias H. (1999) *Biogeochemia Pierwiastków Śladowych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 400 ps. (in Polish).
- Kovalskij V.V. (1977) *Geochemische Ökologie*. Biogeochemie. Berlin, VEB Deutscher Landwirtschaftsv, 352 s.
- Moiseenko T.I., Morgunov B.A., Gashkina N.A., Megorskiy V.V., Pesyakova A.A. (2018) Ecosystem and human health assessment in relation to aquatic environment pollution by heavy metals: case study of the Murmansk region, northwest of the Kola Peninsula, Russia *Environ. Research Let.* (13), 065005.
- Oganov A.R. (Ed.) (2011) *Modern Methods of Crystal Structure Prediction*. WILEY-VCH, 274 p. ISBN:3527409394.
- Pan Yi Wen. (1986) Effects of molybdenum and tungsten supplementations on molybdenum- and copper- enzymes of female rats. A thesis in food and nutrition. Submitted to the Graduate Faculty. Texas Tech. University. Lubbock: TSU, 46 p.
- Sarian V.K., Mkrtchyan A.R., Ermakov V.V., Nazarenko A.P., Lyubushin A.A., Mescheryakov R.V. (2020) Hybrid Monitoring Systems for Global Processes. The Results of the Experiment at the First Point of the Hybrid System. *Armen. J. Phys.* **14**(3), 243-254.
- Skinner H.C.W., Ehrlich H. (2014) *Biomineralization. Treatise on Geochemistry*. Elsevier Ltd., 106-141.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00804-4>
- Treatise on Geochemistry (2004). *Biogeochemistry*. **8**. Ed. by W.H. Schlesinger. Amsterdam et al.: Elsevier Pergamon, 800 p.
- Vereshchaka A.L., Lunina A.A., Mikaelyan A.S., (2021) Surface chlorophyll concentration as a mesoplankton biomass assessment tool in the Southern Ocean region. *Global Ecology and Biogeography*. **31**(2).
<https://doi.org/10.1111/geb.13435>