

Янин Е.П. Основные обобщения геохимии как теоретическая база и методологические принципы изучения техногенного загрязнения биосферы (к 155-летию со дня рождения В.И. Вернадского) // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды, 2018, № 4, с. 2–24.

Детальное познание истории химических элементов, участвующих в основных процессах на Земле, является одной из важнейших задач современной геохимии, поскольку эти процессы, в конечном счете, определяют нормальное состояние и нормальное функционирование биосферы. В настоящее время скорость и направленность многих процессов нарушены или изменены в результате разнообразной деятельности человека. Для того чтобы понять, оценить и контролировать эти процессы, необходимо изучить их на атомарно-молекулярном уровне. Именно в геохимии, имеющей экологическую (в широком понимании этого слова) основу, были заложены возможности открытия новых путей для получения научных знаний об этих процессах. В работе систематизированы основные законы, представления и обобщения геохимии, являющиеся теоретической базой и методологическими принципами изучения техногенного загрязнения биосферы.

Геохимия – наука, изучающая химический состав Земли, распространенность в ней химических элементов и их изотопов, закономерности распределения химических элементов в различных геосферах, законы поведения химических элементов в природных процессах. Основоположники геохимии – В.И. Вернадский (Россия), В.М. Гольдшмидт (Норвегия), Ф.У. Кларк (США), А.Е. Ферсман (Россия). Термин «геохимия» впервые (в 1838 г.) был использован К.Ф. Шёнбейном (Швейцария) для обозначения науки о химических процессах в земной коре, но общепризнанное значение получил после классических работ В.И. Вернадского [68]. Согласно В.И. Вернадскому, основным объектом геохимии являются химические элементы и их изотопы; предмет геохимии – геохимическая история химических элементов на нашей планете, которая сводится к их миграции – переносу, концентрированию (накоплению) и переходу элементов из одного состояния (формы нахождения) в другое. Главная теоретическая проблема геохимии – установление закономерностей поведения химических элементов в геосферах Земли. Основные задачи – исследование распространенности химических элементов и определение среднего состава земной коры, установление закономерностей распределения элементов и их изотопов в Земле в целом, в ее геосферах, горных породах, рудах, минералах, почвах, водах, живых организмах; изучение миграции химических элементов, приводящей к их концентрированию или рассеянию, образованию горных пород и минералов, геохимических провинций, месторождений полезных ископаемых и связанных с ними геохимических ореолов и потоков рассеяния, установление закономерностей изменения химического состава окружающей среды (биосферы и ее составных частей) в условиях техногенного воздействия. В решении этих задач геохимия в той или иной мере связана с минералогией, кристаллохимией, петрологией, геофизикой, литологией, другими разделами геологии, с аналитической химией, агрохимией, биологией, геогигиеной, географическими науками.

Теоретическая база геохимии – физические и химические законы поведения вещества в различных термодинамических условиях, свойственных геосферам Земли. Важнейший методологический принцип геохимии – историзм, основанный на изучении эволюции миграции элементов за период геологической истории, особенностей состава атмосферы, гидросферы и литосферы прошлых геологических эпох, геохимических факторов

возникновения и развития жизни и среды ее обитания – биосферы – на Земле. Фактическим основанием геохимии служат количественные данные о содержании и распределении химических элементов и их изотопов в различных компонентах, о формах нахождения элементов и их поведении в природных и техногенных системах. Получение этих сведений опирается на геологическую характеристику территории и компонентов, современные физические, физико-химические и химические методы определения элементов в минеральном, жидком, газообразном и живом веществе, математические и статистические методы обработки данных. Геохимия выработала собственные методы исследования: метод глобальных геохимических констант (кларков химических элементов – их глобальных средних содержаний в земной коре, в литосфере и т. д.), изучение механизма формирования и химической эволюции земной коры на основе представлений о геохимических циклах с учетом принципиальной роли живого вещества, геохимическое картирование и районирование, методы физико-химического анализа парагенезиса химических элементов, метод анализа изменений в геологических процессах соотношений содержания близких по геохимическим свойствам элементов и особенно изотопов и др.

Современная геохимия представляет собой комплекс научных дисциплин, объединяемых единой методологией и конкретными методами исследований. Геохимические особенности основных оболочек Земли – литосферы, атмосферы и гидросферы – изучаются соответственно геохимией литосферы, атмогеохимией и гидрогеохимией (гидрохимией, геохимией природных вод). Исследованием геохимической роли живых организмов занимается биогеохимия. Органическая геохимия изучает историю, условия накопления и геохимическую роль неживого органического вещества. В центре внимания геохимии литогенеза находятся химический состав и физико-химические условия формирования осадочных горных пород и руд, их эволюция в ходе геологической истории, распространенность элементов в осадочных породах, закономерности поведения, распределения и миграции элементов и их ассоциаций в процессах седиментации, диагенеза отложений и эпигенеза. Геохимия природных процессов подразделяется на геохимию эндогенных (магматических, гидротермальных, метаморфических) и экзогенных (гипергенных) процессов. В связи с особой актуальностью наибольшее внимание уделяется геохимическим процессам рудообразования, биогенным процессам и геохимии техногенеза. Геохимия ландшафта исследует химический состав и миграцию химических элементов в ландшафте, свойства ландшафтных систем и особенности их функционирования и развития с помощью анализа миграции атомов. Региональная геохимия изучает геохимические особенности различных территорий – стран, областей, районов, провинций и т. д. Выделение в пределах определенного региона геохимических территориальных единиц (геохимическое районирование) используют при прогнозировании и поисках месторождений полезных ископаемых, при агрогеохимической и медико-геохимической оценке территорий, при решении проблем охраны окружающей среды и других прикладных задач. Понимание процессов и механизмов формирования первичных и вторичных геохимических ореолов и потоков рассеяния вокруг рудных тел является основой геохимических поисков полезных ископаемых. Изотопная геохимия исследует поведение изотопов и изотопные сдвиги в химических элементах под влиянием различных геологических, геохимических и космохимических процессов и разрабатывает критерии использования этих данных для решения теоретических и прикладных задач геологии, в том числе, с целью реконструкции важ-

нейших событий в истории химических элементов и, следовательно, в истории земной коры, Земли в целом, метеоритов и (космохимия) Солнечной системы. Основные проблемы геохимии радиоактивных элементов и изотопов исследуются радиогеологией, главными задачами которой являются изучение поведения радиоактивных элементов в геологических процессах, поиск месторождений радиоактивных руд, исследование энергетических процессов в земной коре, связанных с радиоактивностью; определение абсолютного возраста горных пород и минералов по накоплению продуктов распада радиоактивных изотопов, идущего с постоянной скоростью. В связи с особой актуальностью сырьевых и экологических проблем все большую роль приобретает геохимия отдельных элементов, прослеживающая историю каждого из химических элементов и их изотопов. В последние годы в качестве самостоятельных направлений оформились физическая геохимия (наука о физико-химических процессах формирования минералов, горных пород и руд, земной коры и мантии, атмосферы, гидросферы), термобарогеохимия (комплекс методов изучения физико-химических условий процессов минералообразования по особенностям состава газовой-жидких и твердых включений в минералах), геохимическая экология, которая исследует взаимодействия организмов и их сообществ с геохимической средой в биосфере; агрогеохимия, основная задача которой заключается в выявлении природных и антропогенных закономерностей изменения геохимических свойств сельскохозяйственных территорий (агроландшафтов), качества и количества сельскохозяйственной продукции; экологическая геохимия, изучающая историю химических элементов в биосфере в условиях проявления биогеохимических функций человечества.

Итак, детальное познание истории химических элементов, участвующих в основных процессах на Земле, является одной из важнейших задач современной геохимии, поскольку эти процессы, в конечном счете, определяют нормальное состояние и нормальное функционирование (говоря словами В.И. Вернадского) лика Земли, особой охваченной жизнью наружной оболочки земной коры – биосферы [8]. В настоящее время скорость и направленность многих процессов нарушены или изменены в результате разнообразной деятельности человека. Для того чтобы понять, оценить и контролировать эти процессы, необходимо изучить их на атомарно-молекулярном уровне. Именно в геохимии, имеющей экологическую (в широком понимании этого слова) основу, были заложены возможности открытия новых путей для получения научных знаний об этих процессах, а следовательно, для практического применения ее законов, принципов, представлений и достижений.

Химический состав биосферы в разных местах земной поверхности закономерно различен и, как подчеркивал В.И. Вернадский [15], теснейшим образом связан с геологическим характером местности, с ее литологическим составом, со сгущениями разных форм жизни; живое вещество охватывает и регулирует в области биосферы все или почти все химические элементы. Геохимическая гетерогенность является характерной особенностью строения биосферы, основным ее проявлением. С геохимической точки зрения любые естественные образования – природный компонент, геологическое тело, ландшафт, экосистема – определяются, прежде всего, своим элементарным химическим составом, т. е. характерным только для них количественным распределением химических элементов.

Главной силой, определяющей химический состав наружной оболочки земной коры, основой формирования и существования биосферы является живое вещество [71, 75], т. е., по В.И. Вернадскому, совокупность живых организмов, в данный момент существу-

ющих в биосфере, выраженная в массе, элементарном химическом составе, мерах энергии и характере пространства, которое «в биосфере играет основную роль и по своей мощности ни с чем, ни с какой геологической силой не может быть сравниваемо по своей интенсивности и непрерывности во времени. В сущности, оно определяет все основные химические закономерности в биосфере, ее структуру» [15, с. 220]. Живое вещество есть планетное явление и является геологической функцией биосферы, от которой не может быть оторвано; живое вещество – могущественная геохимическая сила нашей планеты, а вызываемая ею биогенная миграция атомов представляет форму организованности первостепенного значения в строении биосферы. «В живом веществе создалась новая геологическая сила ума и техники, раньше на нашей планете небывалая, которая нам кажется беспредельной и, возможно, в будущем выходящей за пределы планеты» [13, с. 49]. Этой новой геологической силой является человечество, которое «как живое вещество, неразрывно связано с материально-энергетическими процессами определенной геологической оболочки земли – с ее *биосферой*. Оно не может физически быть от нее независимым ни на одну минуту» [17, с. 237]. Новую форму биогеохимической энергии, каковой является «техническая работа человечества, сложно руководимая его мыслью – сознанием», В.И. Вернадский называет энергией человеческой культуры или культурной биогеохимической энергией, а в качестве новой геологической силы выделяет биогеохимическую функцию человечества. Человек, утверждает В.И. Вернадский, может менять и меняет химические процессы биосферы в такой степени, которая сравнима в своем геологическом значении с биогенной миграцией 1-го и 2-го рода всех организмов, вместе взятых. В настоящее время в биосфере начинает доминировать биогенная миграция атомов 3-го рода, идущая под влиянием жизни, воли и разума человека, являющаяся одним из самых грандиозных геохимических процессов и представляющая собой форму организованности первостепенного значения в строении биосферы [5].

Деятельность человека как геохимического фактора и ее проявления в биосфере, по словам В.И. Вернадского, есть отдельный факт великого общего, исторического нового природного явления: «... мы имеем природный процесс..., имеющим тот же самый характер, как и все остальные геохимические процессы, с которыми нам приходится сталкиваться» [19, с. 91]. «С геохимической точки зрения труд человечества является одной из величайших геохимических сил... Это явление выступает на первое место в вопросах, изучаемых в геохимии. Здесь мы всегда должны принимать деятельность культурного человечества как такое же проявление естественных сил, как и все другие формы живой материи» [13, с. 71]. В.И. Вернадский отмечает возможность непредвиденных последствий воздействия человека на биосферу и называет наименее устойчивые природные среды – атмосферу и гидросферу. «Лик планеты – биосферы – химически резко меняется человеком сознательно и главным образом бессознательно. Меняется человеком физически и химически воздушная оболочка суши, все ее природные воды» [14, с. 219].

Таким образом, В.И. Вернадский показал, что преобразование природы деятельностью человека является в основе своей геохимическим процессом, имеет глобальный характер и есть закономерное явление в геологической истории Земли. Ученик В.И. Вернадского А.Е. Ферсман [54] вслед за своим учителем также называет человека грандиозным геохимическим агентом и отмечает, что хозяйственная и промышленная деятельность человека по своему масштабу и значению сделалась сравнимой с процессами самой приро-

ды, человек производит колоссальное распыление вещества в своей технической деятельности и геохимически переделывает мир во все растущих темпах. Совокупность геохимических и минералогических процессов, вызываемых технической (инженерную, горно-техническую, химическую, сельскохозяйственную) деятельностью человека, была названа Ферсманом техногенезом [57]. Так, в сущности, и была – В.И. Вернадским и А.Е. Ферсманом – сформулирована важнейшая экологическая проблема современности – проблема изменения химического состава биосферы под воздействием человеческой деятельности (или, в утилитарном понимании, проблема загрязнения окружающей среды) и с позиций геохимии обоснованы теоретическая база и методологические принципы изучения этого феномена.

В качестве важнейших положений геохимии, имеющих первостепенное значение для понимания геохимической структуры и функционирования биосферы и ее составных частей в современных условиях (в условиях техногенеза), можно, очевидно, предложить следующие эмпирические обобщения (т. е. закономерности реальности, выведенные только из совокупности точно установленных эмпирических фактов и поэтому практически независимые от широко принятого в науке домысливания ненаблюдаемых сторон реальности с помощью приемов формальной логики [16]), в той или иной мере обозначенные в трудах В.И. Вернадского и его последователей и отчасти сформулированные ранее [62, 64–66]:

1) повсеместное распространение всех химических элементов периодической системы Менделеева во всех геосферах, в любом объеме земного вещества, где они находятся в относительно устойчивых динамических равновесиях («формах нахождения»), различных для каждой среды нахождения (закон Вернадского-Кларка о «всюдности» химических элементов);

2) поведение химических элементов в геосферах определяется в основном строением их атомов, отраженным периодической системой Менделеева: распространение элементов в большей степени связано со строением и устойчивостью ядер атомов; миграция элементов определяется главным образом строением внешних электронных оболочек атомов (закон Гольдшмидта);

3) в земной коре ведущее значение имеют элементы с низким атомным весом и малыми порядковыми номерами (правило Менделеева-Ферсмана); кларки элементов четных порядковых номеров выше кларков нечетных элементов: из трех соседних – по периодической системе – элементов больший кларк принадлежит элементу четному (закон четности Оддо-Гаркинса);

4) непрерывная миграция химических элементов (атомов и соединений) во времени и пространстве, осуществляемая в биосфере или при непосредственном участии живого вещества, или в среде, геохимические особенности которой обусловлены живым веществом (закон Вернадского); все биогенные миграции и все биогеохимические функции, согласно Вернадскому, могут быть сведены:

- к 1-му биогеохимическому принципу: биогенная миграция атомов химических элементов в биосфере всегда стремится к максимальному проявлению;

- к 2-му биогеохимическому принципу: эволюция видов в ходе геологического времени, приводящая к созданию форм жизни, устойчивых в биосфере, идет в направлении, увеличивающем биогенную миграцию атомов биосферы;

5) цикличность геохимических процессов, в значительной мере осуществляемая при участии живого вещества, включая переход элементов в течение геологического времени из одной геосферы в другую (непрерывный круговой процесс химических элементов Вернадского);

6) в биосфере в ходе биологического круговорота атомы поглощаются живым веществом и заряжаются энергией; покидая живое вещество, они отдают накопленную энергию в окружающую среду; за счет этой биогенной энергии осуществляются многие химические реакции; в результате биологического круговорота формируется окислительно-восстановительная зональность биокосных систем (закон биологического круговорота);

7) все земное вещество проникнуто и охвачено водой, играющей огромную роль в геохимических процессах; биосфера является областью, где вода господствует и по массе и по своему геологическому значению; в течение практически всего геологического времени для воды и живого вещества характерны тесная связь и огромное взаимное влияние (Э. Дюбуа-Реймон: «Жизнь есть одушевленная вода»);

8) относительное многообразие видов и форм существования химических элементов в природе, меняющихся в ходе их миграции; преобладание рассеянного состояния элементов над концентрированным, особенно характерное для химических элементов с малым кларком и высокой технофильностью;

9) неразрывность живого вещества и окружающей среды; «все наиболее распространенные и важные в живом веществе элементы принадлежат к наиболее распространенным элементам земной коры» (принцип неразрывности Вернадского: «явления жизни и явления мертвой природы... являются проявлением единого процесса»);

10) все живое вещество Земли физико-химически едино (закон физико-химического единства живого вещества Вернадского);

11) в основе всех геологических процессов лежит закон дифференциации вещества Земли, определяющий зональность распределения химических элементов во всех измерениях и на всех уровнях организации вещества;

12) поведение химических элементов в процессах земной коры, их распределение по типам расплавов-растворов, породам и рудам, изоморфизм в минералах и геохимическая периодичность определяются близостью отношений порядковых номеров и атомных весов соответствующих элементов (в форме катионов или анионов) к числам 1, 2, 4 (общее геохимическое правило К.А. Власова);

13) закономерное различие (неоднородность, мозаичность) химического состава биосферы в различных местах земной поверхности (физико-химическая гетерогенность биосферы);

14) зависимость поведения химических элементов от миграционной и геохимической структуры ландшафтов, в свою очередь подчиненной географической закономерности (закону широтной и вертикальной зональности); каждая ландшафтная зона – это особая геохимическая зона с особым типом биологического круговорота атомов и своеобразными условиями их миграции.

15) в настоящее время изменение геохимической структуры биосферы является следствием проявления биогеохимических функций человечества (как неотъемлемой части живого вещества), основным проявлением которых является биогенная миграция атомов 3-го рода.

Повсеместная распространенность химических элементов в настоящее время не вызывает сомнений. «В капле воды мы должны найти все химические элементы», – образно писал В.И. Вернадский [15, с. 210]. Закон о повсеместном распространении всех элементов периодической системы Менделеева в любом объеме земного вещества (названный Н.И. Сафроновым законом Вернадского-Кларка) лежит в основе представлений о геохимическом поле. Согласно Л.В. Таусону и его коллег, под геохимическим полем понимается «геологически однородное горное пространство, характеризующееся близкими физико-химическими условиями образования минеральных ассоциаций, имеющих сходные парагенезисы и уровни содержания химических элементов» [52, с. 5]. Авторы различают две большие группы геохимических полей: геохимические поля рассеяния, которые абсолютно преобладают на Земле, и геохимические поля концентрирования. Н.Н. Трофимов и А.И. Рычков [53] предлагают различать нормальные геохимические поля и аномальные геохимические поле. Первые – отражают характер распределения близких (по содержанию) к кларкам химических элементов в неизменных объектах; образование их связано с процессами рассеяния элементов. Аномальные геохимические поля, включающие геохимические аномалии и ореолы, выделяются на фоне нормальных полей. Геохимическая аномалия, по мнению указанных авторов, это любое отклонение в содержаниях и распределении элементов от нормального поля. Геохимический ореол – это отклонение от нормального поля, связанное непосредственно с процессами рудной минерализации. Специфическими особенностями геохимических полей является их многомерность, обусловленная участием в их формировании многих (в принципе всех) химических элементов, и высокая дискретность их строения [2]. Н.И. Сафроновым [48; 49] было сформулировано понятие о всеобщем геохимическом поле рассеяния элементов в земном пространстве. Отражением всеобщей распространенности элементов служат их кларки, т. е. «количественное соотношение элементов для определенного пространственного, термодинамического, исторически сложившегося энергетического уровня (например, для отдельных геосфер)» [58, с. 402]. А.Е. Ферсман называл кларк «величайшей константой» космической системы и данного элемента и указывал на необходимость постоянного уточнения значений кларков земной коры и космических тел и определения кларков геохимических и космохимических систем по отдельным химико-энергетическим уровням [55]. А.А. Беус [1], характеризуя особенности распределения химических элементов в литосфере, предлагает различать глобальные параметры распределения, которые отражают статистические закономерности содержания элементов в различных типах пород для земной коры в целом; региональные параметры – характерные для отдельных геохимических провинций; локальные параметры – типичные для ограниченных по площади геологических образований. Для характеристики относительного содержания химических элементов В.И. Вернадским (и, в сущности, для оценки геохимических аномалий) был предложен так называемый кларк концентрации, который представляет собой отношение содержания элемента в рассматриваемом объекте к его кларку в земной коре. В земной коре преобладают элементы с легкими ядрами, содержащими четное число протонов. Эта особенность распространения элементов была установлена В. Гаркинсом, развившего идеи Г. Оддо (элементы, атомный вес которых может быть разделен на 4, сильно преобладают в земной коре [18]). А.Е. Ферсман [56] обратил внимание на то, что с утяжелением атомного ядра кларки элементов уменьшаются.

Подходы к изучению геохимических процессов, протекающих в различных геосферах, во многом базируются на учении о геохимических циклах, о «непрерывных круговых процессах химических элементов», идущих при участии живого вещества [3, 11, 12, 15, 33]. Эти циклы осуществляются как посредством круговорота химических элементов из одной геосферы в другую (первичный круговой процесс, по В.И. Вернадскому [6, 9, 18], или большой геохимический цикл, по Б. Мейсону [29]), так и в пределах конкретной геосферы (вторичный круговой процесс, или малый геохимический цикл). Различают два основных типа геохимических циклов: круговороты газообразных веществ и осадочные циклы. Как заметил Дж. Фортескью [60], малый геохимический цикл, по сути, представляет собой экологическую часть схемы геохимического цикла. Именно в эту часть цикла наиболее активно вмешивается человек. В.И. Вернадский [9] считал, что геохимическая история большинства элементов, образующих около 99,7% массы биосферы, может быть понятна только с учетом круговых миграций, поскольку в значительной мере основана на изучении законов таких миграций атомов. Тем не менее он отметил [9, 18], что геохимические циклы обратимы лишь в главной части атомов, часть же их закономерно неизбежно и постоянно выходит из круговорота, т. е. круговой процесс не является вполне обратимым. По мнению В.А. Ковды [28], степень повторяющегося воспроизводства геохимических циклов в природе очень велика и вероятно достигает 90–95–98%. Всякий растворимый, но нелетучий химический элемент может совершать замкнутый естественный круговорот только через биосферу [7]. Образование живого вещества и разложение органических веществ образуют единый биологический круговорот атомов, который идет в биосфере повсеместно, в разных формах и с разной интенсивностью [36]. В биосфере протекают две основных разновидности биогеохимических циклов – атмосферогеохимический круговорот в системе суша-океан и континентальный круговороты. В.А. Ковда [28] выделяет следующие основные группы и типы биогеохимических циклов: на уровне микробных экосистем и популяций, на уровне низших беспозвоночных организмов почв и водоемов, в лесных и травянистых биогеоценозах, регионально-бассейновые циклы, циклы в системе суша-атмосфера-океан. Особое значение имеют локальные биогеохимические циклы, ярким примером которых служит локальный круговорот ртути [77, 78]. Основная часть металлов, вовлекаемых в глобальные круговороты, обычно происходит из природных источников; в локальных круговоротах могут преобладать «техногенные» химические элементы.

Современное состояние геохимического поля является временной стадией длительных процессов перегруппировки элементов, осуществляемых путем геохимической миграции, которая, по А.Е. Ферсману [57], представляет собой комплекс процессов, идущих во времени и ведущих к пространственному перемещению химического элемента, с изменением его содержания (и, нередко, формы нахождения) в данном участке, с накоплением или рассеянием в других участках. Ферсман выделил внутренние и внешние факторы миграции, а также обосновал понятие «геохимические свойства элементов» (такие черты химических элементов, которые проявляются у них в природных процессах миграции). Обычно различают четыре основных вида миграции химических элементов: механическую, физико-химическую, биогенную, техногенную [34–36]. Необходимо отметить, что (с точки зрения терминологии – как науки о терминах) подобное разделение (классификация) геохимической миграции (ближайшее родовое понятие) на указанные четыре

вида (ближайшие видовые понятия) есть явная логическая ошибка, поскольку техногенная миграция есть *вид* биогенной миграции.

Интенсивность миграции во многом обусловлена химическими свойствами элементов, одновременно определяясь и их кларками. Кларки элементов в земной коре в основном зависят от строения их атомных ядер, а миграция – от строения электронных оболочек и ядер [76]. Основываясь на идеях Гольдшмидта, А.Н. Заварицкий [26] сформулировал закон, гласящий, что нахождение химических элементов в земной коре зависит от строения их атомов. Этот закон, в несколько измененной формулировке, логичнее называть законом Гольдшмидта-Вернадского, поскольку зависимость распространенности элементов в земной коре от строения их атомного ядра еще раньше была показана В.И. Вернадским (средний химический состав земной коры «связан со строением атомов» [19, с. 66]). К важнейшим внутренним факторам миграции относятся [36, 57, 59]: 1) термические свойства элементов, их летучесть или тугоплавкость; 2) химические свойства соединений; 3) энергетические свойства ионов, определяемые их кристаллохимическими параметрами и связанные с ними явления изоморфизма; 4) гравитационные свойства – массы атомов, плотности различных элементов и их соединений; 5) радиоактивные свойства, определяющие изменение изотопного состава элементов. Особенно велика зависимость миграционной способности элементов от типа химической связи, электроотрицательности, размеров атомов и ионов, валентности – важнейших геохимических параметров элементов. Основными внешними факторами миграции являются: 1) температура; 2) давление; 3) концентрация вещества (химического элемента), определяющая ход событий согласно закону действующих масс; 4) степень ионизации растворов и расплавов; 5) концентрация водородных ионов, величина рН; 6) окислительно-восстановительный потенциал растворов, Eh; 7) поверхностные силы природных коллоидных систем и связанные с ними явления сорбции элементов и их соединений; 8) равновесие фаз (правило фаз); 9) действие живых организмов. Сочетание факторов миграции создает геохимическую обстановку миграции, в которой протекают геохимические процессы, обуславливающие перераспределение химических элементов, приводящее к их рассеянию или концентрированию.

При изменении внешних условий в пространстве и(или) во времени меняются и условия миграции химических элементов, что может сопровождаться их концентрированием на контактах различных сред с контрастными физико-химическими параметрами в виде гипергенных новообразований. Такие геохимические сопряжения, в пределах которых на коротком расстоянии происходит резкая смена условий миграции элементов, называют геохимическими барьерами [34]. Обычно они имеют механический, физико-химический или биогеохимический характер, хотя, как правило, геохимический барьер нередко сочетает в себе черты всех трех основных типов. В различных геохимических обстановках миграции конкретный химический элемент, обладая присущими только ему геохимическими свойствами, характеризуется специфическим поведением. А.И. Перельман [35] ввел понятие о разнообразии миграции химического элемента и обратил внимание на зависимость разнообразия миграции от кларка – чем ниже кларк, тем у химически сходных элементов она меньше. Им также был сформулирован принцип подвижных компонентов: геохимические особенности гипергенных процессов характеризуются наиболее активно мигрирующими и одновременно накапливающимися главными (типоморфными) элементами [34]. В природных условиях типоморфность элемента зависит от его кларка и

миграционной способности. Каждая ландшафтная зона характеризуется наиболее ярким проявлением типичных лишь для нее геохимических процессов (типоморфный комплекс геохимических процессов [35]).

При изучении процессов миграции химических элементов необходимо учитывать их геохимическую периодичность. Согласно К.А. Власову [22], под геохимической периодичностью (по аналогии с химической периодичностью) понимается периодическое повторение химических и физико-химических свойств элементов, которые определяют сходство в их поведении в различных геохимических и минералообразующих процессах земной коры (их сочетание в парагенетические ассоциации, совместная миграция и т. д.). Геохимическими аналогами оказываются элементы, отношения атомных весов и порядковых номеров которых близки к 1, 2 или 4. Количество геохимических аналогов больше, чем химических, а потому геохимическая периодичность характеризуется более обширными сферами действия, нежели химическая. К.А. Власовым было сформулировано общее геохимическое правило, согласно которому, поведение химических элементов в процессах земной коры, их распределение по типам расплавов-растворов, породам и рудам, изоморфизм в минералах и геохимическая периодичность определяются близостью отношений порядковых номеров и атомных весов соответственных элементов (в форме катионов или анионов) к указанным выше числам.

В ходе миграционных процессов осуществляется дифференциация земного вещества, что определяет зональность распределения химических элементов в геологических системах. Дифференциация вещества Земли – есть закономерное отражение движения и развития материи в пространстве и времени, что особенно проявляется в геологических процессах и в тех закономерностях, которые определяют образование продуктов этих процессов [31]. Последние характеризуют единство зональности и стадийности – дифференциации в движении, динамической дифференциации, осуществляемой с помощью различных процессов и механизмов. Основу зональности и стадийности составляет разная подвижность химических элементов, зависящая как от их внутренних свойств, так и от внешней среды, в которой происходит миграция. Протекание всех природных процессов в гравитационном поле Земли разделяет подвижные компоненты и неизбежно формирует ту или иную зональность. Все разнообразие путей дифференциации магм и растворов, образование горных пород, рудных месторождений и других минеральных ассоциаций сводится к группировке и пространственному разобщению элементов по сходству и различию их физико-химических свойств в соответствии с указанной закономерностью [31].

В результате непрерывно идущих процессов рассеяния и концентрирования, для разных элементов проявляющихся различно, химический состав экосистем, геологических тел, природных компонентов отличается количественной неоднородностью (геохимической гетерогенностью). В.И. Вернадским было введено в науку понятие о парагенезисе химических элементов [4], т. е. о совместном, закономерном нахождении их в различных компонентах земной коры (закон геохимической корреляции, по Ферсману [57]). Практически каждое геологическое тело отличается индивидуальностью химического состава (ему соответствует определенный участок геохимического поля, отличный по ряду признаков от других участков, соответствующих геологическим типам того же уровня). Для характеристики свойств таких геологических тел используют понятие «геохимические ассоциации», под которыми А.Е. Ферсман [57] понимает сообщества химических элементов,

отражающих дифференциацию геохимического поля, исторически и закономерно сложившихся на тех или иных участках земной коры и характеризующихся определенными качественно-количественными параметрами.

Геохимическая неоднородность (мозаичность, гетерогенность) – важнейшая особенность биосферы. Химический состав живых организмов неизбежно меняется в зависимости от состава окружающей среды, однако состав организмов стабильнее, благодаря регуляторным процессам гомеостаза, являющимся адаптацией к жизни в изменчивой среде [27]. Поэтому, как подчеркивал В.И. Вернадский, организм способен существовать не только в пределах поля существования жизни, но и в пределах поля устойчивости жизни. Тем не менее в зависимости от химического состава среды может изменяться обмен веществ и приспособляемость организмов к геохимическим условиям.

Это позволило А.П. Виноградову [21] обосновать и ввести понятие о биогеохимических провинциях, которые представляют собой области на Земле, отличающиеся от соседних областей по уровню содержания в них химических элементов и вследствие этого вызывающие различную биологическую реакцию со стороны местной флоры и фауны. В результате резкой недостаточности или, наоборот, избыточности содержания какого-либо химического элемента (или нескольких элементов) в пределах биогеохимических провинций возникают биогеохимические эндемии, заболевания растений, животных и людей. В концепции биогеохимических провинций существенны два момента [24]: 1) признание очевидной гетерогенности химического состава биосферы (живого вещества и геохимической среды); 2) исключительно важная биохимическая и функциональная роль химических элементов в жизнедеятельности организмов. Идея биогеохимической гетерогенности и зональности биосферы (континентов) послужила основой для выделения регионов биосферы, субрегионов биосферы и биогеохимических провинций. Биогеохимические провинции рассматриваются как специфические (атипичные) экосистемы в пределах континентов и классифицируются по различным признакам.

При характеристиках геохимического поля и геохимической миграции (рассеяния и концентрирования) химических элементов особое значение имеет знание форм нахождения последних. Это понятие, введенное В.И. Вернадским, является одним из основополагающих в геохимии и, как не странно, наименее обоснованным с методологических позиций. В.И. Вернадский, как известно, предложил различать четыре основных формы нахождения химических элементов в земной коре: 1) минералы и строящиеся ими горные породы; 2) магмы; 3) рассеяние химических элементов («осколки атомов», «микрокосмическое состояние»); 4) нахождение химических элементов в живых организмах. В ряде своих работ В.И. Вернадский конкретизирует представления о формах нахождения элементов. Он отмечает, что в биосфере все физико-химические явления и процессы подчиняются законам равновесия и должны совершаться за счет некоторой внешней энергии [7, 18, 19]. Особую роль играют параметры равновесия (температура и давление), а также физическое (фазовое, агрегатное) состояние вещества, слагающего равновесие, и, в свою очередь, определяющего физическое состояние химических элементов, которые строят земную кору (фазы геологических тел). Дальнейшие рассуждения ученого позволили ему выделить так называемые компоненты равновесия, или конкретные формы выявления химических элементов. Земная кора включает несколько оболочек, характеризующихся присущими только им параметрами равновесия, фазами равновесия и компонентами равнове-

сия. В биосфере, по В.И. Вернадскому [15], существует семь типов вещества: 1) живое вещество (совокупность живых организмов); 2) биогенное вещество, создаваемое и перерабатываемое живыми организмами; 3) косное вещество, образуемое процессами, в которых живое вещество не участвует; 4) биокосное вещество, которое создается одновременно живыми организмами и косными процессами; 5) вещество, находящееся в радиоактивном распаде в форме немногих относительно прочных радиоактивных элементов; 6) рассеянные атомы; 7) вещество космического происхождения. Ю.Е. Сагет и Н.И. Несвижская [42] предлагают различать так называемые минералого-геохимические формы нахождения, выделяемые, например, во вторичных ореолах рассеяния по формально-генетическому признаку. Так, важнейшими минералого-геохимическими формами, включающими элементы-индикаторы во вторичных наложенных ореолах в аллохтонных отложениях, являются: водорастворимые соединения (преимущественно сульфаты и хлориды тяжелых металлов), обменно-сорбированный комплекс, карбонаты и труднорастворимые сульфаты, гидроксиды железа, марганца, алюминия и кремния, органическое вещество, глинистые минералы, сульфиды (гипергенные, преимущественно пирит). А.И. Перельман [34] отмечает присутствие в литосфере подвижных и инертных форм нахождения химических элементов. Подвижная форма представляет собой такое состояние элемента в горных породах, почвах и т. д., находясь в котором он легко может переходить в раствор и мигрировать. Инертная форма – это такое состояние элемента, в котором он в условиях данной обстановки обладает низкой миграционной способностью и не способен или почти не способен переходить в раствор и мигрировать. В.И. Вернадский [11] выделяет так называемое поле устойчивости минерала (химического соединения), т. е. среду, в которой они могут существовать без распада на другие соединения или на свои составные элементы. Среда определяется химическим своим характером и физическими своими свойствами. Поэтому, очевидно, логичнее говорить об условно (потенциально) подвижных и условно инертных (прочносвязанных) формах нахождения элементов (типах состояния). Безусловно, обоснование принципов и критериев выделения «форм нахождения элементов» и создание иерархической системы «форм нахождения» является одной из насущных теоретических и методологических проблем в геохимии. Предварительно можно, видимо, различать (в самом первом приближении и с определенной долей условности) следующие «формы и способы нахождения» химических элементов в биосфере [72]: 1) местонахождение химических элементов, т. е. системы разнообразных химических равновесий, способных удерживать элементы неопределенное время («области разного состояния атомных систем»): а) оболочки-геосферы, б) геологические тела, в) тип биосферного вещества; 2) состояние химических элементов – концентрированное и рассеянное; 3) вид существования химических элементов – стабильные (устойчивые) и нестабильные (радиоактивные) изотопы; 4) форму выявления элементов – минеральная и безминеральная; 5) фазовое (агрегатное) состояние вещества (фазы геологических тел), слагающего указанное выше равновесие (газообразное, растворенное, коллоидное; твердое), что позволяет говорить о фазовых формах нахождения химических элементов (газообразная, растворенная, твердая, коллоидная); б) минералого-геохимическую форму, заключающую (закрепляющую, фиксирующую) химические элементы; 7) тип состояния химических элементов, или конкретную форму нахождения (выявления) элементов (ион, комплексный ион, молекула, макромолекула, химическое соединение и его вид и т. д.). В геохимической литературе такие

понятия, как «формы нахождения» (которых множество) и «формы миграции» (число которых ограничено) химических элементов, нередко используются как синонимы, что вряд ли правомочно. Форма миграции химического элемента зависит от местонахождения химического элемента и в значительной мере определяется фазовым состоянием вещества, минералого-геохимической формой, заключающей элемент, и его конкретной формой нахождения (типом состояния), а также физико-химическими особенностями среды миграции. Так, в условиях зоны гипергенеза химические элементы могут мигрировать преимущественно в четырех фазовых формах нахождения – газообразной, растворенной (в растворах), коллоидной и твердой (взвешенной). Например, некий химический элемент мигрирует в речных водах в двух фазовых формах нахождения – взвешенной и растворенной, где, в свою очередь, может закрепляться в различных минералого-геохимических формах и/или проявлять специфический тип состояния.

В настоящее время доказано, что преобладающим для всех химических элементов является рассеянное состояние. Так, суммарные учтенные запасы металлов всех известных месторождений составляют ничтожную часть массы первых двух километров земной коры континентов: соотношение равно 1 (земная кора) : $4 \cdot 10^{-8}$ (запасы месторождений) [32]. А.Е. Ферсман [57] называет рассеянным такое существование химического элемента в природе, при котором его содержание не превышает кларка (т. е. кларк концентрации данного элемента меньше единицы). Концентрирование элементов – явление, обратное рассеиванию, приводящее в предельных случаях к формированию месторождений. А.П. Соловов предлагает понимать под рассеянным состоянием элемента такое, когда его содержание близко его кларку, а под концентрированным – когда содержания элемента близки к его содержанию в полезных ископаемых, из которых этот элемент извлекается в промышленных целях [50]. Процесс концентрирования вещества в естественных условиях земной коры крайне редок и протекает в очень специфических условиях (например, на геохимических барьерах). Для большинства рудных и редких элементов кларк концентрации в промышленных рудах колеблется от 100 до 500. Более низкие уровни концентрирование – от 10 до 100 (средние уровни) и от 1 до 10 (низкие уровни) в природе развиты значительно шире [52]. Концентрированное состояние характеризуется не только степенью концентрации, но и массой (запасами) элементов в объекте [51]. Замечено, что элементы широкого распространения с высокими кларками в своем концентрированном выражении в собственных минералах никогда не достигают тех кларков концентрации, которые свойственны элементам с низкими кларками [48]. Создается впечатление, что, с одной стороны, подобные элементы распределены более равномерно, чем те, у которых кларки низкие, с другой – элементы с низкими кларками способны к более интенсивному концентрированию в объектах биосферы. Низкие кларки многих элементов – одна из причин ограниченности числа их минералов [46].

В основе теории геохимических методов поисков рудных месторождений лежит концепция, рассматривающая процесс образования месторождений как единственно возможный переход химических элементов от изначально рассеянного состояния в земной коре и мантии к концентрированному состоянию с многоступенчатой дифференциацией, приводящей к обязательному образованию первичных геохимических ореолов [30–32]. Возникновение вторичных гипергенных ореолов и потоков рассеяния, связанное с разрушением месторождений и их первичных ореолов, является единственно возможным об-

ратным процессом – переходом, также дифференцированным, от концентрирования вновь к рассеянию. Концентрирование химических элементов в результате тех или иных процессов может приводить к образованию месторождений, в строении которых схематично можно выделить рудную часть, т. е. собственно рудные тела, и ореольную часть (первичные ореолы), т. е. участки околорудного пространства, обогащенные (или обедненные) определенными компонентами, всегда сингенетичные с рудными телами и представляющие собой их естественные продолжения [51]. В силу различных обстоятельств рудные тела и первичные ореолы подвергаются воздействию разнообразных внешних факторов, что активизирует геохимические процессы и обуславливает миграцию вещества рудных тел и первичных ореолов. В конечном счете это приводит к формированию в зоне гипергенеза геохимических (рудогенных) аномалий – вторичных ореолов и потоков рассеяния химических элементов, на изучении которых основаны геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых [31, 47–49, 51].

В ходе распространения различных веществ, поступающих от самых различных техногенных источников загрязнения, в биосфере (в окружающей среде) также образуются техногенные геохимические аномалии (техногенные ореолы и потоки рассеяния), которые, в сущности, являются своеобразными аналогами геохимических аномалий, формирующихся в районе месторождений полезных ископаемых (особенно рудных) [23, 39, 43]. Это в свое время позволило использовать для выявления зон загрязнения окружающей среды методы и приемы геохимии, апробированные при поисках месторождений полезных ископаемых и геолого-съемочных работах [33, 38–41, 43, 44, 45].

Для понимания важнейших проблем и постановки основных задач изучения геохимического преобразования биосферы человеком важнейшее значение имеют следующие положения, в той или иной мере вытекающие из трудов В.И. Вернадским, получившие развитие в работах его учеников и последователей и отчасти сформулированные автором этих строк ранее [62, 64–66]:

1. Изменение химического состава, геохимических свойств и геохимической структуры биосферы, являющееся следствием проявления биогеохимических функций человечества, – закономерное явление в ее геологической истории, это есть естественный (геологический) процесс, который имеет глобальный характер и проявляется в масштабе природных химических реакций.

2. Современный этап в развитии биосферы может быть охарактеризован как своеобразная геохимическая эпоха, когда человек постепенно (с нарастающим темпом) вовлекает в биогенную миграцию 3-го рода все химические элементы, а в круг своего влияния все химические процессы, известные в биосфере, создает на земной поверхности «неустойчивые формы нахождения химических элементов», вмешивается в действия основных биогеохимических принципов.

3. Биогенная миграция атомов 3-го рода (в понимании В.И. Вернадского) определяется не только технической деятельностью человека. Человечество является частью живого вещества, в связи с чем способно вызывать миграцию химических элементов, связанную с его материальным субстратом. Однако здесь мы сталкиваемся с новым фактором – с человеческим сознанием, с научной мыслью, которая выявляется как сила, имеющая небывалое значение в геологической истории биосферы, в истории практически всех химических элементов. Техногенная миграция есть вид биогенной миграции 3-го рода.

4. Техногенез (в понимании А.Е. Ферсмана) является полиэлементным источником загрязнения и приводит к формированию в окружающей среде аномальных геохимических полей (техногенных геохимических аномалий), фиксируемых прежде всего для химических элементов с высокой технофильностью, повышенной токсичностью, высоким уровнем биопоглощения и/или обладающих выраженной биоактивностью. При этом наблюдаются выраженные корреляционные связи между техногенными источниками загрязнения, миграцией химических элементов в водных и воздушных потоках и их концентрированием в природных телах, временно аккумулирующих загрязняющие вещества.

5. Техногенез и техногенные процессы способны резко менять поведение химических элементов, вплоть до появления химических реакций и соединений, а также явлений, чуждых условиям биосферы; или, как писал В.И. Вернадский, человек «совершенно меняет общую картину геохимических процессов земной коры» и создает новые типы связанных с биосферой геологических тел и образований (минералов, отложений, почв, вод и т.п.), новые типы экосистем, живого вещества, уничтожая и(или) преобразуя при этом ранее существовавшие живые организмы, природные системы и геологические образования.

6. В условиях максимального проявления биогеохимических функций человечества геохимические особенности ландшафтов могут всецело определяться химическими элементами, отличающихся высокой токсичностью или выраженной биоактивностью даже при крайне низких уровнях их содержания в объектах среды обитания, что отражается в формировании техногенных биогеохимических районов, областей и провинций. Наиболее сильное воздействие испытывают атмосфера и водные системы, причем, как подчеркивал Вернадский, «нигде явления человеческой работы не сказываются так ярко и глубоко, как для царства вод пресных».

7. Антропогенный (техногенный) стресс и загрязнение окружающей среды химическими элементами и их соединениями, в том числе, ксенобиотиками (веществами, ранее в природе не существовавшими) являются одними из основных лимитирующих факторов для всего живого в биосфере.

8. Техника (как совокупность средств человеческой деятельности) и технология (как совокупность методов производства) уже не могут рассматриваться только лишь как инструмент преобразования биосферы, но сами являются окружающей человека средой, что особенно ярко проявляется в промышленных районах, отражающих наиболее концентрированную форму геохимического воздействия человека на среду обитания. Дальнейшее устойчивое развитие общества возможно лишь при должной оптимизации состояния окружающей среды с учетом происходящих в ней геохимических изменений, или, говоря словами В.И. Вернадского, необходимо изменение химической работы человечества.

10. Цивилизация культурного человечества не может прерваться, поскольку это есть большое природное явление, отвечающее геологически сложившейся организованности биосферы. Важнейшим условием этого является переход биосферы в ее новое эволюционное состояние – ноосферу, когда биогеохимические функции человечества будут урегулированы с окружающей средой как в интересах «свободно мыслящего человечества как единого целого», так и в интересах самой биосферы; когда биогенная миграция атомов 3-го рода в прямом смысле будет руководима человеческим разумом, а человек из существа социально гетеротрофного делается существом социально автотрофным. «В геологиче-

ской истории биосферы перед человеком открывается огромное будущее, если он поймет это не будет употреблять свой разум и свой труд на самоистребление» [17, с. 240].

Существующие в настоящее время подходы к оптимизации взаимодействия человека и биосферы все еще не дают ключа к пониманию того, как эффективнее всего подойти к решению этой сложной проблемы. Декларируемые в последние годы концепции устойчивого развития, экологической безопасности и улучшения среды обитания во многом определены искусственно, без должного обоснования, поскольку зачастую базируются на интуитивном подходе, а иногда просто на эмоциях. Это во многом связано с отсутствием надежных сведений, отражающих влияние человеческой деятельности на окружающую среду, обычно рассматриваемое как совершенно нежелательное и даже случайное явление. В то же время, как показал В.И. Вернадский (и как отмечено было выше), деятельность человека и ее проявление в биосфере «не есть случайное явление, зависящее от воли человека», а есть отдельный факт общего природного явления, закономерного и обусловленного эволюционным развитием биосферы как среды «жизни и разума». Именно поэтому этот факт (и его наиболее концентрированное проявление – техногенез) должен рассматриваться и изучаться как «природный процесс, корни которого лежат глубоко и подготовлялись эволюционным процессом, длительность которого исчисляется сотнями миллионов лет» [16, с. 28].

Важнейшей задачей современных наук о Земле является получение знаний, необходимых для обоснования и разработки принципов и методов оптимизации взаимодействия человека и биосферы. Решение этой задачи, по мнению автора этих строк, в существенной степени базируется на достижениях современной геохимии. Как подчеркивал В.И. Вернадский [13, с. 21], «подходя к научному изучению природы, мы никогда не должны и не можем забывать, что оно... неизбежно связано с практическим значением его в жизни человечества... Особенно это должно чувствоваться, когда мы касаемся вопросов геохимии, где культурная жизнь человечества является могучей силой, меняющей химические явления нашей планеты. Очевидно, что изучение хода развития роста геохимического значения человечества должно повести за собой и большее проникновение человека в понимание прикладного характера научной работы».

Новая отрасль знания, призванная изучать влияние жизни на геохимические процессы, была названа В.И. Вернадским биогеохимией: «Биогеохимия – новая большая отрасль геохимии... изучает влияние жизни на историю земных химических элементов...; она исследует те перемещения земных атомов – миграции их масс, которые вызываются живыми организмами», биогеохимия «может... рассматриваться... как геохимия биогенных процессов». Основная задача ее – точное количественное и качественное, возможно, полное выявление геохимических функций живого вещества в биосфере. При этом «биогеохимия... может изучаться в трех аспектах: во-первых, с биологической стороны – ее значение для познания явлений жизни; во-вторых, с геологической стороны – ее значение для познания среды жизни, т.е. прежде всего биосферы, и в-третьих, в связи с ее прикладным значением, которое может быть сведено к биогеохимической роли человечества» [14, с. 12–13]. Так были обозначены три важнейших направления геохимического изучения биосферы, которые в настоящее время, по мнению автора этих строк, оформились в самостоятельные научные дисциплины. Это геохимическая экология [25, 27], геохимия ландшафта [35, 37] и экологическая геохимия [61, 62, 65, 66], обладающие признаками, определя-

Ющими существование самостоятельной научной дисциплины: они имеют достаточно четкое содержание, собственные предмет, методику исследований и терминологию, в той или иной мере характеризуются системностью знаний, что отражается наличием научных фактов, понятий и обобщений. Таким образом, исторически сложилось так, что именно В.И. Вернадским была обозначена важнейшая научная проблема современности – биогеохимическая роль человечества, разрешением которой, по его мнению, должен был заниматься особый раздел биогеохимии, уже в наши дни оформившийся в самостоятельную научную дисциплину – экологическую геохимию [63, 70], которая научно изучает историю химических элементов в биосфере в условиях проявления биогеохимических функций человечества. Поскольку геохимическая «история... элементов... может быть всегда сведена к их... миграциям» [10, с. 43], то можно сказать, что экологическая геохимия изучает биогенную миграцию атомов 3-го рода и ее проявления в биосфере. Таким образом, биогенная миграция атомов 3-го рода (антропогенная геохимическая миграция), идущая в биосфере под влиянием жизни, воли, разума человека, является предметом исследования экологической геохимии [66, 67, 69].

Важнейшие проявления антропогенной геохимической миграции (биогенной миграции атомов 3-го рода) могут быть сведены к геохимическим процессам и явлениям, их пространственно-временным отражениям и взаимодействиям в биосфере, включая появление в ней новых (с геохимической точки зрения) геологических тел и образований. Можно говорить о двух классах задач, которые реализуются в экологической геохимии: а) задачи эвристические, связанные с научным изучением биогеохимических функций человечества и биогенной миграции атомов 3-го рода, состоящие в получении нового знания, как такового, его упорядочении и обобщении; эти задачи определяют фундаментальную сторону эколого-геохимических исследований; б) задачи прикладные, направленные на оценку состояния биосферы как среды (по В.И. Вернадскому) «жизни и разума», выявление масштабов и последствий преобразования биосферы деятельностью человека, использование полученных знаний в практике.

С методических позиций система методов, способов и приемов экологической геохимии, базирующаяся на основных обобщениях и принципах геохимии, может рассматриваться в трех аспектах. Первый связан со способами получения эколого-геохимической и сопутствующей информации (точность, репрезентативность, достоверность). Второй отражает особенности исследовательской стратегии (полевые и лабораторные эксперименты, полученные результаты, приемы обработки и представления данных). Третий аспект имеет отношение к синтезу данных, внедрению полученных знаний в практику и переводу их в общедоступную форму. Можно считать, что к настоящему времени основные методические принципы и общая технология эколого-геохимических исследований (в первую очередь, прикладных) разработаны достаточно детально, особенно для главных типов природно-техногенных территорий: городов и городских агломераций, сельскохозяйственных и горнопромышленных районов. В значительной мере они основаны на существующих корреляционных связях между источниками поставки (техногенными источниками загрязнения), миграцией химических элементов (водные и воздушные потоки) и их концентрированием в природных компонентах, временно депонирующих загрязняющие вещества (почвы, снежный покров, донные отложения). Действительно, воздействие источников загрязнения приводит к формированию в окружающей среде техногенных гео-

химических аномалий, т. е. участков территории (акватории), в пределах которых хотя бы в одном из слагающих их природных тел (компонентов) статистические параметры распределения химических элементов и их соединений достоверно отличаются от вариаций геохимического фона (от фонового содержания). Различные характеристики техногенных геохимических аномалий, являющихся, по сути, зонами техногенного загрязнения – масштаб, морфометрия, состав, степень концентрирования, вид существования, формы миграции и нахождения химических элементов и их соединений, особенности их трансформации и перераспределения, интенсивность биопоглощения, степень экотоксичности и т. п. – в конечном счете определяют качество окружающей среды.

В общем случае логика эколого-геохимических исследований такова: 1) выявление источников и способов поступления загрязняющих веществ, установление и анализ изучение техногенных геохимических ассоциаций, содержаний и форм нахождения химических элементов в твердых отходах, выбросах, сточных водах, средствах химизации; 2) прослеживание путей и изучение механизмов миграции загрязняющих веществ в биосфере (среде обитания, окружающей среде), установление природных компонентов, взаимодействующих с миграционным потоком, оценка интенсивности и результатов этого взаимодействия (анализ и оценка техногенных геохимических аномалий и образований); 3) оценка масштабов и площади распространения геохимических аномалий, выявление их морфоструктурных особенностей, центров наиболее интенсивного распространения и воздействия, характеризующихся максимальным влиянием на живые организмы, прежде всего на человека; 4) эколого-геохимическая и геогигиеническая оценка выявленных техногенных геохимических аномалий, прослеживание накопления загрязняющих веществ в трофических цепях, изучение последствий этого накопления.

Эколого-геохимические исследования направлены на изучение двух аспектов распределения и поведения химических элементов в биосфере: пространственного и временного. Этим определяет комплекс используемых методов и методических приемов. В пространственном отношении эколого-геохимические исследования осуществляются на импактном (площадь изучаемой территории не более 10 км²), локальном (площадь изучаемой территории обычно не превышает 100–500 км²), региональном (городские агломерации, крупные промышленно-урбанизированные регионы и т. п.) и глобальном уровнях. Во временном аспекте эколого-геохимические исследования могут относиться к конкретному (одному) моменту времени, к нескольким временным моментам, могут быть связаны с постоянными (непрерывными, регулярными, режимными) наблюдениями или с ретроспективными исследованиями. Важнейшими приемами пространственных исследований относящихся, по сути, к одному временному моменту, являются: 1) наблюдения в отдельной точке; 2) геохимическое профилирование (наблюдения на одном или нескольких профилях, включая исследования на ландшафтно-геохимических профилях); 3) геохимическое картирование, основанное преимущественно на регулярном площадном опробовании депонирующих загрязняющие вещества компонентов окружающей среды (аналитическом измерении) по заданной сети точек; 4) «объемные» геохимические исследования, направленные на изучение и геологических тел (почвенные разрезы, донное зондирование и т. п.), которые могут сочетаться с указанными выше методическими приемами.

Основными приемами временных исследований являются: 1) выполнение выше указанных исследований в разные временные моменты (без строгой периодичности); 2) ди-

намические наблюдения (относительно короткопериодные) на отдельных точках, створах, профилях, по сети точек и т. п.; 3) геохимический мониторинг, основанный на непрерывных, повторных и режимных наблюдениях (со строго определенной периодичностью); 4) ретроспективный геохимический мониторинг и ретроспективные эколого-геохимические исследования, связанные с изучением распределения и поведения химических элементов в предшествующее время. Особую группу составляют методы, в основу которых положены разработки биогеохимии, геогигиены, эпидемиологии, аналитической химии, связанные с исследованиями конкретных компонентов окружающей среды, механизмов миграции, форм нахождения и миграции химических элементов и их соединений, оценкой биогеохимических и гигиенических последствий загрязнения и т. п. При необходимости комплекс эколого-геохимических методов дополняется гидрометеорологическими, гидрологическими, геологическими, литологическими, минералогическими и другими видами исследований. Особое место принадлежит химико-аналитическим исследованиям геохимических проб. Как писал В.И. Вернадский [20, с. 282], «... геохимия и биогеохимия – по существу основаны на аналитической химии – области знания огромного практического и научного значения». В значительной своей части эколого-геохимические исследования базируются на использовании количественных химико-аналитических методов.

Масштабы техногенного воздействия на окружающую среду исключительно велики [3, 28, 37, 44, 73, 74]. Техногенные преобразования захватывают огромные территории, проявляются в глубокой и коренной трансформации всех компонентов биосферы и представляют собой главный фактор, определяющий экологические особенности многих регионов мира, а в конечном счете и условия существования здесь человека.

«Где остановится этот новый геологический процесс? И остановится ли он?» [10, с. 223]. В поисках ответов на эти вопросы особая роль, по мнению автора этих строк, принадлежит наукам геохимического цикла, прежде всего, экологической геохимии.

Литература

1. Беус А.А. Геохимия литосферы. – М.: Недра, 1981. – 335 с.
2. Баранов Э.Н. Геохимические поля рудообразующих систем: генетические и прикладные аспекты // Международ. симпозиум по прикладной геохимии стран СНГ: 29–31 октября 1997 г., Москва. Тезисы докладов. – М.: ИМГРЭ, 1997, с. 16–18.
3. Биосфера: Пер. с англ. – М.: Мир, 1972. – 183 с.
4. Вернадский В.И. Парагенезис химических элементов в земной коре // Дневник XII съезда русских естествоиспытателей и врачей. 1909–1910. – М., 1910, с. 73–91.
5. Вернадский В.И. Химический состав живого вещества в связи с химией земной коры. – Пг.: Время, 1922. – 48 с.
6. Вернадский В.И. Живое вещество в химии моря. – Пг.: Научн. хим.-техн. изд-во, 1923. – 36 с.
7. Вернадский В.И. Ход жизни в биосфере // Природа, 1925, № 10/12, с. 25–38.
8. Вернадский В.И. Биосфера. – Л.: Научн. хим.-техн. изд-во, 1926. – 146 с.
9. Вернадский В.И. Очерки геохимии. – М.-Л.: Гос. изд-во, 1927. – 368 с.
10. Вернадский В.И. Избранные сочинения. Т. 1. – М.: Изд-во АН СССР, 1954. – 696 с.
11. Вернадский В.И. Избранные сочинения. Т. 3. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 508 с.

12. *Вернадский В.И.* Избранные сочинения. Т. 4, кн. 2. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 651 с.
13. *Вернадский В.И.* Живое вещество. – М.: Наука, – 1978. – 358 с.
14. *Вернадский В.И.* Проблемы биогеохимии. – М.: Наука, 1980. – 320 с.
15. *Вернадский В.И.* Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. – М.: Наука, 1987. – 339 с.
16. *Вернадский В.И.* Философские мысли натуралиста. – М.: Наука, 1988. – 520 с.
17. *Вернадский В.И.* Научная мысль как планетное явление. – М.: Наука, 1991. – 271 с.
18. *Вернадский В.И.* Очерки геохимии // В.И. Вернадский. Труды по геохимии. – М.: Наука, 1994, с. 159–468.
19. *Вернадский В.И.* Очерки геохимии (Введение в геохимию): Лекции, прочитанные в Академии наук в Петрограде в 1921 г. // В.И. Вернадский. Труды по геохимии. – М.: Наука, 1994, с. 7–158.
20. *Вернадский В.И.* Статьи об ученых и их творчестве. – М.: Наука, 1997. – 364 с.
21. *Виноградов А.П.* Биогеохимические провинции и эндемии // ДАН СССР, 1938, т. 18, № 4/5, с. 283–286.
22. *Власов К.А.* Периодический закон и изоморфизм элементов. – М.: ИМГРЭ, 1963. – 96 с.
23. *Глазовская М.А.* Природные аналоги техногенных геохимических аномалий // Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем. – М.: Наука, 1982, с. 131–166.
24. *Ермаков В.В.* Биогеохимические провинции: концепция, классификация и экологическая оценка // Основные направления геохимии. – М.: Наука, 1995, с. 183–196.
25. *Ермаков В.В.* Геохимическая экология как следствие системного изучения биосферы // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии (Труды Биогеохимической лаборатории, 1999, т. 23). – М.: Наука, 1999, с. 152–182.
26. *Заварицкий А.Н.* Введение в петрохимию изверженных горных пород. – М.: Изд-во АН СССР, 1944. – 329 с.
27. *Ковальский В.В.* Геохимическая экология. – М.: Наука, 1974. – 299 с.
28. *Ковда В.А.* Биогеохимические циклы в природе и их нарушение человеком // Биогеохимические циклы в биосфере. – М.: Наука, 1976, с. 19–85.
29. *Мейсон Б.* Основы геохимии: Пер. с англ. – М.: Недра, 1971. – 312 с.
30. *Овчинников Л.Н.* Образование рудных месторождений. – М.: Недра, 1988. –
31. *Овчинников Л.Н.* Прикладная геохимия. – М.: Недра, 1990. – 247 с.
32. *Овчинников Л.Н.* Прогноз рудных месторождений. – М.: Недра, 1992. – 308 с.
33. Оценка состояния окружающей среды г. Москвы по геохимическим данным и рекомендации по ее улучшению. – М.: ИМГРЭ, 1980. – 70 с.
34. *Перельман А.И.* Геохимия эпигенетических процессов. – М.: Недра, 1965. – 272 с.
35. *Перельман А.И.* Геохимия ландшафтов. – М.: Высшая школа, 1975. – 342 с.
36. *Перельман А.И.* Геохимия. – М.: Высшая школа, 1989. – 528 с.
37. *Перельман А.И., Касимов Н.С.* Геохимия ландшафта. – М.: Астрей-2000, 1999. – 768 с.
38. *Ревич Б.А., Саэт Ю.Е., Смирнова Р.С., Сорокина Е.П.* Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территорий городов химическими элементами. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 112 с.
39. *Саэт Ю.Е.* Антропогенные геохимические аномалии (особенности, методика изучения и экологическое значение): Автореф. ... дис. доктора геол.-мин. наук. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 53 с.
40. *Саэт Ю.Е., Алексинская Л.Н., Янин Е.П.* Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения поверхностных водотоков химическими элементами. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 74 с.
41. *Саэт Ю.Е., Башаркевич И.Л., Ревич Б.А.* Методические рекомендации по геохимической оценке источников загрязнения окружающей среды. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 66 с.

42. *Сает Ю.Е., Несвижская Н.И.* Изучение форм нахождения элементов во вторичных ореолах рассеяния. – М.: ВИЭМС, 1974. – 45 с.
43. *Сает Ю.Е., Онищенко Т.Л., Янин Е.П.* Методические рекомендации по геохимическим исследованиям для оценки воздействия на окружающую среду проектируемых горнодобывающих предприятий. – М.: ИМГРЭ, 1986. – 99 с.
44. *Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др.* Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
45. *Сает Ю.Е., Янин Е.П.* Методические рекомендации по геохимической оценке состояния поверхностных вод. – М.: ИМГРЭ, 1985. – 48 с.
46. *Сауков А.А.* Геохимия. – М.: Наука, 1975. – 480 с.
47. *Сауков А.А.* Геохимические очерки. – М.: Наука, 1976. – 556 с.
48. *Сафронов Н.И.* Основы геохимических методов поисков рудных месторождений (методическое пособие): Ч. 1. – Л.: ВИТР, 1962. – 145 с.
49. *Сафронов Н.И.* Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. – Л.: Недра, 1971. – 216 с.
50. *Соловов А.П.* Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. – М.: Недра, 1985. – 294 с.
51. *Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых.* – М.: Недра, 1990. – 335 с.
52. *Таусон Л.В., Гундобин Г.М., Зорина И.Д.* Геохимические поля рудно-магматических систем. – Новосибирск: Наука, 1987. – 202 с.
53. *Трофимов Н.Н., Рычков А.И.* Геохимические поля элементов широкого рассеяния и поиски глубокозалегающих рудных месторождений. – М.: Недра, 1979. – 172 с.
54. *Ферсман А.Е.* Химические проблемы промышленности. – Л.: Химтехиздат, 1924. – 52 с.
55. *Ферсман А.Е.* Периодический закон количества элементов // ДАН СССР, сер. А, 1932, № 11, с. 261–266.
56. *Ферсман А.Е.* Геохимия: Т. 1. – Л.: ОНТИ-Госхимтехиздат, 1934. – 324 с.
57. *Ферсман А.Е.* Геохимия: Т. 2. – Л.: ОНТИ-Химтеорет, 1934. – 354 с.
58. *Ферсман А.Е.* Геохимия: Т. 3. – Л.: Госхимтехиздат, 1937. – 503 с.
59. *Ферсман А.Е.* Избранные труды. Т. V. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 858 с.
60. *Фортескью Дж.* Геохимия окружающей среды: Пер. с англ. – М.: Прогресс, 1985. – 360 с.
61. *Янин Е.П.* Экологическая геохимия: исходные положения и эмпирические обобщения // Проблемы экологической минералогии и геохимии: Тез. докл. Годичного собрания Минералогического общества РАН, Санкт-Петербург, 21–23 мая 1997 г. – СПб., 1997, с. 5–6.
62. *Янин Е.П.* Истоки, принципы и основные понятия экологической геохимии // Геохимические исследования городских агломераций. – М.: ИМГРЭ, 1998, с. 13–40.
63. *Янин Е.П.* К истории эколого-геохимических исследований в ИМГРЭ // Геохимические исследования городских агломераций. – М.: ИМГРЭ, 1998, с. 158–165.
64. *Янин Е.П.* Принципы и методические основы эколого-геохимических исследований // Отечественная геология, 1999, № 1, с. 54–58.
65. *Янин Е.П.* Введение в экологическую геохимию. – М.: ИМГРЭ, 1999. – 68 с.
66. *Янин Е.П.* Экологическая геохимия и проблемы биогенной миграции химических элементов 3-го рода // Техногенез и биогеохимическая эволюция таксонов биосферы (Труды Биогеохимической лаборатории, т. 24). – М.: Наука, 2003, с. 37–75.
67. *Янин Е.П.* О предмете экологической геохимии // Прикладная геохимия. Вып. 6. Экологическая геохимия Москвы и Подмосковья. – М.: ИМГРЭ, 2004, с. 23–38.

68. Янин Е.П. Геохимия // Новая Российская энциклопедия: В 12 т. Том 4 (2). – М.: ООО «Издательство «Энциклопедия»: ИД «ИНФРА-М», 2007, с. 210–212.
69. Янин Е.П. Экологическая геохимия: предмет и методические основы (к 75-летию со дня рождения Ю.Е. Саета) // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2010, № 5, с. 57–70.
70. Янин Е.П. Начальные этапы развития эколого-геохимических исследований в СССР (к 80-летию со дня рождения Ю.Е. Саета) // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2015, № 11, с. 3–36.
71. Янин Е.П. Основные положения учения В.И. Вернадского о живом веществе и его биохимических функциях // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2016, № 9, с. 19–30.
72. Янин Е.П. Формы нахождения химических элементов в осадках городских сточных вод: Обзор // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2017, № 5, с. 101–168.
73. Янин Е.П. Геохимические последствия хозяйственной деятельности человека // Экологическая экспертиза, 2017, № 3, с. 2–43.
74. Янин Е.П. Техногенез и окружающая среда: эколого-геохимические аспекты // Геоэкологические исследования состояния окружающей среды. – М.: ИМГРЭ, 2017, с. 8–45.
75. Янин Е.П. Учение В.И. Вернадского о живом веществе, его биохимических функциях и геохимической роли в биосфере // Экологические системы и приборы, 2017, № 3, с. 45–55.
76. Goldschmidt V.M. Geochemistry. – Oxford: Clarendon Press, 1954. – 730 p.
77. Wood J.M. Biological cycles for toxic elements in the environment // Science, 1974, 183, p. 1049–1054.
78. Wood J.M. Biological cycles for elements in the environment // Die Naturwissenschaften, 1975, 8, p. 357–365.