

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ЖИЗНИ ПЛАНЕТЫ

В.А. Кирюхин, Л.П. Норова

Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

«Жизнь – это одушевленная вода» – эти слова, сказанные немецким физиологом Э. Дюбуа еще в конце XIX века, являются ключевыми для понимания роли воды в жизни биосферы. Жизнь и вода тесно связаны между собой, поскольку без воды жизнь невозможна. Эта связь прослеживается на всех этапах развития нашей планеты. Она несколько усложнилась в антропогенный период, когда возникла новая ситуация в связи с проявлениями и усилениями воздействия техногенных процессов на биосферу. Изменились интенсивность и направленность обмена живого вещества с косной материей. Если в доантропогенное время биота использовала вещества, которые ей необходимы для ее жизнедеятельности, то после появления человека заметно увеличилось количество элементов, вовлекаемых биотой в биогеохимический круговорот вещества. Их число резко возросло, а продолжительность циклов круговорота химических элементов стала во многом зависеть от техногенных факторов и потому – трудно поддаваться объяснению и объективной оценке.

А.И. Перельман [8] ввел понятие технофильности элементов, а Ф.И. Тютюнова [11] провела статистический анализ 30 химических элементов. Она оценивала степень использования этих элементов в техногенных процессах для периода 1800–2025 гг. (в XXI веке – в порядке прогноза). По степени технофильности изучаемые элементы были разбиты на 5 основных групп: супертехнофильные, высокотехнофильные, технофильные, слаботехнофильные и очень слаботехнофильные. В группу супертехнофильных элементов включены те из них, которые составляют основу состава подземных вод. Главное место среди них занимают основные анионогенные элементы: фтор (F^-), сера (SO_4^{2-} , HS^-), углерод (HCO_3^- , CO_3^{2-}), органические соединения, фосфор (P), азот (NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^-), селен (Se), свинец (Pb), медь (Cu), бром (Br) и др. В группу высокотехнофильных элементов включены железо (Fe), кальций (Ca), цинк (Zn), мышьяк (As), хром (Cr), уран (U), никель (Ni), молибден (Mo), ртуть (Hg) и другие элементы.

Химические элементы супер- и высокотехнофильных групп вызывают загрязнение подземных вод в большинстве регионов мира. В этих процессах особенно усилилось участие таких элементов, как углерод, азот и железо.

Добыча, транспортировка, переработка и сжигание углеводородов привело почти к повсеместному загрязнению окружающей среды. Особенно активно в этих процессах участвуют нефть и нефтепродукты.

Огромные объемы промышленных и коммунальных стоков, широкое применение азотных удобрений способствуют региональному загрязнению подземных вод азотными соединениями.

Из недр извлечены миллиарды тонн железа, а на его окисление из атмосферы потребляется огромная масса кислорода. Образующиеся при этом окислы железа активно участвуют в гипергенных процессах, загрязняя природную среду. С другой стороны, ухудшение условий водообмена, замена окислительной среды на восстановительную в результате техногенных процессов приводит к появлению и накоплению в подземных водах трехвалентного железа.

Глобальный характер приобрело радиоактивное загрязнение окружающей среды и подземных вод. Оно связано с массовыми испытаниями ядерного оружия в 50–60-х годах прошлого века, катастрофами на атомных станциях, разработкой, транспортировкой и хранением ядерных отходов.

Ф.И. Тютюнова [11] рассматривает два вида метаморфизации химического состава подземных вод – частичную и полную. При частичной метаморфизации изменяется только микрокомпонентный состав подземных вод, а также величины рН и Eh при сохранении макрокомпонентного состава этих вод. Полная метаморфизация химического состава подземных вод характеризуется глубокими преобразованиями, вплоть до смены химического типа подземных вод.

Вода участвует в разных видах круговорота (климатическом, гидрологическом, гидрогеологическом, геологическом), а также в его биологическом и техногенном циклах, которые в совокупности определяют условия жизни на нашей планете. С другой стороны, биосфера активно участвует в процессах своей жизнедеятельности, обеспечивая определенный уровень ее организации, регулирования и контроля. Появление человека привело к нарушению существовавших природных равновесий. В атмосфере, например, уменьшается содержание кислорода, увеличивается количество углекислого газа, растет запыленность, загрязненность, возрастает среднегодовая температура воздуха. Промышленные и бытовые стоки значительно ухудшили гидрохимический режим поверхностных водотоков и водоемов. Пресные подземные воды зоны гипергенеза

испытывают в некоторых районах мощную техногенную нагрузку, что приводит к уменьшению их ресурсов и ухудшению качества. Строительство и эксплуатация гражданских и промышленных сооружений, разработка месторождений полезных ископаемых и другая инженерно-техническая деятельность людей приводит к созданию нового ландшафта, изменению водного баланса и перемещению огромных масс пород. В результате на урбанизированных территориях природная среда становится техногенной со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Подземная гидросфера в этих условиях выполняет важную экологическую роль, которую можно распределить по следующим направлениям: ресурсное, гидрогеохимическое, защитное, эволюционное, гидрогеодинамическое, гидрогеофизическое, гидрогеоэнергетическое и информационное. Каждая природная оболочка Земли по-своему сопротивляется техногенному на нее воздействию. Экологические функции литосферы, которые она использует в борьбе с подобными явлениями, подробно рассмотрены в работах В.Т. Трофимова и его коллег [10, 13]. Мы также неоднократно обращались к этой проблеме, но применительно к подземной гидросфере [4, 5, 6]. Развитию данных работ способствуют труды А.А. Карцева и его коллег [3, 9].

Переходим к рассмотрению выделенных выше экологических направлений в гидрогеологии.

Ресурсное направление. Подземные воды могут иметь различное целевое назначение: хозяйственно-питьевое, сырьевое (жидкие руды), лечебное, теплоэнергетическое. Особое значение имеют воды питьевого назначения. В то время как возможности использования пресных поверхностных вод непрерывно сокращаются вследствие их активного загрязнения, подземные воды остаются последним резервом человечества в условиях надвигающегося водного кризиса. По мнению некоторых американских ученых, в 2115 году почти половина населения Земли (3 млрд человек) будет жить в странах, испытывающих дефицит воды, возникающий при обеспеченности населения водой менее чем 700 м^3 в год. Эти страны располагаются на Ближнем Востоке, в Южной Азии, в большинстве стран Африки.

Важно отметить, что ресурсная база водопотребления сокращается не только вследствие загрязнения воды, но и по причине роста народонаселения. Кроме того, следует иметь в виду, что увеличивается потребительский спрос – как индивидуальный,

так и промышленный и сельскохозяйственный – по причине значительной интенсификации использования воды для различных производственных и бытовых целей. В прошлом веке водопотребление возросло с 400 до 4000 км³ в год, а численность населения увеличилась с 1 млрд 600 млн до 6 млрд человек.

Общее водопотребление в нашей стране приближается к 100 км³ в год. Подземные воды в этом балансе составляют примерно 1/3. Средний модуль эксплуатационных ресурсов подземных вод для территории нашей страны равен 0,76 л/сек/км² при его колебании от десятых долей до нескольких литров в секунду с квадратного километра площади [14]. При этом общие ресурсы пресных подземных вод оцениваются в 350 км³ в год, из них практически используется примерно 7–8 % от этого количества. Следует также отметить, что в гумидных и предгорных областях условия водоснабжения за счет подземных вод сложились более благоприятные, чего нельзя сказать об аридных областях и районах развития многолетней мерзлоты.

В основном за счет подземных вод обеспечивается водоснабжение городов с населением менее 100 тыс. человек. Крупные города с потребностью более 1–2 млн м³ в сутки снабжаются преимущественно поверхностными водами, но роль подземных вод как стабилизирующего запасного фактора сохраняется.

Подземные воды являются главным источником некоторых видов химического сырья (йод, бром, бор, литий и др.), разных типов минеральных лечебных вод, а также тепла и энергии.

Гидрогеохимическое направление. Прежде чем излагать особенности указанного направления, обратим внимание на то, что все организмы представляют собой жидкие, полужидкие и водные коллоидные системы. Содержание воды в живых организмах превышает 65–70 %, иногда достигая в некоторых представителях морской фауны и флоры 99,9 %. Это означает, что через них в течение года проходит масса воды, в сотни и тысячи раз превышающая их собственный вес. Отсюда следует два важных вывода: 1) в каждый данный момент времени общая масса воды в биосфере достигает 10^{18} – 10^{19} г, что составляет примерно сотые доли процента от веса земной коры мощностью 20 км, или сотые доли процента от веса воды в Мировом океане; 2) через живые организмы в течение нескольких сотен лет проходит объем воды, равный таковому в Мировом океане. На эти особенности биосферы указывал В.И. Вернадский [1].

Как известно, для развития и функционирования живых организмов необходимо 27 химических элементов, из них 11 относятся к макроэлементам. В эту группу включаются: углерод, азот, кислород, водород, кальций, сера, калий, магний, натрий, хлор и фосфор. Все биогенные компоненты находятся в непрерывном движении, которое регулируется биогеохимическими циклами. Различают два вида обмена вещества: медленное и быстрое. В первом случае происходит обмен вещества с литосферой и гидросферой, а во втором – с атмосферой. При взаимодействии с подземной гидросферой биогенные компоненты влияют на формирование ее химического состава, особенно в верхней части разреза – в зоне гипергенеза. Как показано в работах [5, 12], наибольший вклад в химический баланс веществ зоны гипергенеза вносит биогенная составляющая, образующая до 2/3 химического выноса. Эти процессы в значительной мере регулируются ландшафтно-климатическими факторами.

Особенно активно проявляет себя углерод, который участвует в формировании вод гидрокарбонатного состава. Следует обратить внимание на важную роль в этих процессах фитомассы, которая обеспечивает накопление углерода и его соединений в подземных водах. Рост активности биохимических процессов в растительных и почвенных образованиях пространственно совпадает с накоплением гидрокарбонатов в подземных водах. Наиболее благоприятные условия для этого наблюдаются на юге лесной зоны и на севере аридной зоны, благодаря оптимальному соотношению количества выпадающих осадков и теплового режима в почвенно-растительном слое.

Выше мы рассмотрели только один пример взаимодействия подземной гидросферы и биосферы. На самом деле такое взаимодействие происходит везде, где функционирует система вода – порода – газ – живые организмы. Подтверждение этому можно найти в работах А.А. Карцева и его коллег [3], В.А. Кирюхина [4] и др.

Защитное направление. Защитная роль подземной гидросферы определяется способностью подземных вод к самоочищению от загрязнения, что может быть обусловлено как физико-химическими причинами, так и фильтрационными свойствами водоносных систем, препятствующих проникновению загрязнителя. Изучение этих особенностей водоносных систем имеет важное практическое значение, поскольку позволяет решать задачи хозяйственно-питьевого водоснабжения, повышать качество подземных вод. Самоочищение подземных вод контролируется геохимическими барьерами [8]. Геохимические барьеры возникают при резкой смене физико-химических

условий, вызывающих выпадение в осадок компонентов, находящихся в жидкой фазе. Таким барьером может служить не только контакт между твердой и жидкой фазами, но и какой-либо скачок в изменении физико-химической обстановки, содержании отдельных компонентов в жидкой и газовой среде, заметные перемены в температуре, значениях Eh и pH, скоростях движения подземных вод и других параметров, определяющих физико-химическое состояние подземных вод. Знание физико-химических барьеров позволяет управлять физико-химическими процессами в подземных водах, а в естественных условиях – оценивать возможности самоочищения подземных вод от загрязнения.

А.И. Перельман выделил следующие виды геохимических барьеров: окислительный, восстановительный, щелочной, карбонатный, сульфидный, сорбционный, гидроксильный и сорбционно-глинистый. Способность подземных вод к самоочищению определяется действием как прямых, так и косвенных факторов. Среди прямых факторов наиболее важное значение имеет концентрация вещества и форма его миграции, Eh и pH среды, состав газа, температура, минеральный состав пород, сорбционные свойства и водопроницаемость, проявления криогенных процессов, перенос, трансформация и вынос загрязнителей и ряд других показателей. Опосредованное действие на процессы самоочищения подземных вод оказывают радиационный и водный баланс территории, уклон местности, почвенный и растительный покровы, геодинамические условия и гидравлическая связь с другими водоносными системами.

Изучение процессов загрязнения подземных вод и их защитного потенциала предполагает также исследование различных гидрогеологических параметров по площади, глубине и во времени. К таким параметрам могут быть отнесены: глубина залегания подземных вод, мощность залегающих слоев, литология пород, скорость движения подземных вод, коэффициент фильтрации пород, мощность водоупорных слоев (глинистых, замороженных и т.п.), другие параметры.

Изучение защитного потенциала гидрогеологических систем является одной из важнейших задач экологической гидрогеологии.

Эволюционное направление. Как отмечал В.И. Вернадский: «На всем протяжении геологической истории мы наблюдаем теснейшую связь воды и жизни, как в водной среде, так и на суше» [1]. Если говорить о подземной гидросфере, то она прошла сложный путь своего развития: от простейшего появления в земной коре (4,2 млрд лет назад) до многослойного и многоярусного образования, находящегося в тесной

взаимосвязи с другими оболочками Земли – литосферой, наземной гидросферой, атмосферой и биосферой. В процессе эволюции подземной гидросферы состав, свойства и структура подземных вод становятся все более контрастными, образуя различные виды зональности подземных вод – гидрогеодинамическую, гидрогеохимическую, температурную, газовую, изотопную, микробиологическую и др. Круговорот воды, вещества и энергии может нарушать указанные закономерности. За время эволюции Земли вся вода, имеющаяся на планете, участвовала в многообразных циклах круговорота: климатическом, гидрологическом, гидрогеологическом, геологическом и биологическом. Это означает, что первичных вод, не затронутых воздействием окружающей среды, обнаружить на нашей планете невозможно.

Не менее сложной представляется эволюция биосферы. Биота приспосабливается к изменениям природной обстановки на разных этапах ее эволюции. Даже в катастрофических ситуациях она выживала и находила возможности для дальнейшего своего совершенствования и развития. Можно сказать, что биота поддерживала жизнь на планете в режиме, нужном для ее существования. Важная роль в этих процессах принадлежала и воде, которая создавала необходимые условия для функционирования живых организмов.

Иная ситуация сложилась в эпоху антропогена. Скорость возобновления природных ресурсов отстает от темпов их потребления, поэтому человечество находится вне зоны экологической устойчивости. Уменьшается биоразнообразие, происходят опасные климатические изменения, растут масштабы антропогенного загрязнения природной среды, обостряется техногенная обстановка. В этой сложной ситуации вода и жизнь действуют совместно. Вода соответственно реагирует на изменение условий водообмена, а биота старается контролировать ход событий, происходящих в природной обстановке, или хотя бы приспособиться к изменяющимся условиям. В современную эпоху это сделать уже трудно, поскольку происходит сокращение экосистем суши со скоростью 0,5–1,0 % в год [2], а это свидетельствует о том, что дыхание экологического кризиса ощущается все явственнее и определеннее.

Гидрогеодинамическое направление. Вода находится в непрерывном движении. Причины ее динамического состояния могут быть обоснованы разными факторами: гравитационными, тектоническими, литогенными, криогенными, магматическими, сейсмическими, техногенными и др. Скорости движения подземных вод и водообмена с

глубиной затухают, соответственно, нарастает и время взаимодействия воды со вмещающей средой. При этом изменяется насыщенность воды химическими элементами и газами. Отражается это также на структуре и свойствах воды, ее состоянии, температуре. Чем дальше вода находится в толщах горных породах, тем больше вероятность превращения ее из пресной в соленую и даже в рассолы. В условиях многолетней мерзлоты вода способна перейти в другое состояние – лед или криопеги (природные соленые воды с отрицательными температурами). Вблизи магматических очагов она может встречаться в виде горячего пара. В условиях инфильтрационного питания подземные воды представляют собой единственное полезное ископаемое, которое может образовывать возобновляемые ресурсы.

Таким образом, вода, непрерывно двигаясь, меняет формы своего существования (жидкая, парообразная, твердая, молекулярная, надкритическая). Все ею в земной коре, по выражению В.И. Вернадского, «охвачено и пронизано». Вода участвует во всех геологических процессах, являясь одним из активнейших агентов геологической среды. Особенно велика ее роль в геодинамических явлениях: землетрясениях, образовании диапиров, формировании рельефа, в различных физико-геологических процессах.

Гидрогеофизическое направление. Подземная гидросфера участвует в создании некоторых геофизических полей, имеющих важное экологическое значение. К ним относятся: гравитационное, электрическое, магнитное, радиоактивное, тепловое. С одной стороны, эти поля возникли в результате воздействия геологической среды, а с другой стороны, геофизические аномалии, возникшие в гидрогеологических структурах, представляют собой самостоятельный объект изучения, поскольку сказываются на свойствах и поведении подземных флюидов.

Поясним сказанное примером. Гравитационное поле, например, контролирует движение подземных вод от поверхности земли на глубину. Оно способствует, прежде всего, перемещению и образованию скоплений инфильтрационных вод. Весьма важную роль оно играет в формировании седиментационных, биогенных и других вод. Под действием силы тяжести подземные воды вместе с тектоническими пластинами могут опускаться в мантийные глубины, вплоть до земного ядра.

Еще В.И. Вернадский указывал на участие подземных вод в создании электрического поля Земли [1]. Электрическая заряженность подземных вод характеризуется величиной E_h в диапазоне от +700 до -200 мВ. Величина E_h отражает

геохимическую обстановку в изучаемых условиях и определяет направленность окислительно-восстановительных процессов.

Роль магнитного поля Земли в формировании свойств подземных вод, особенно с учетом изменения его положения во времени и в пространстве, остается недостаточно ясной. Известно, что намагниченная вода изменяет свою структуру и свойства. Можно ожидать, что такие процессы происходят и в природной обстановке.

Свою радиоактивность подземные воды приобретают при взаимодействии с водовмещающими породами. Среди естественных радионуклидов чаще всего встречаются уран, радий и радон. Круг техногенных радионуклидов значительно шире. Например, после Чернобыльской аварии среди них оказались Cz^{137} , Sr^{90} , Ru^{105} , Ce^{144} , Pu^{239} . Радиационное загрязнение вследствие Чернобыльской аварии охватило территорию в несколько миллионов квадратных километров.

Температурное поле подземной гидросферы формируется под воздействием двух источников тепла – радиогенного и глубинного. Положение современного слоя постоянных годовых температур, находящегося на глубине 7–15 м, отражает современное состояние нагретости или охлажденности земной поверхности. Многовековое воздействие солнечной энергии может приводить к проникновению экзогенного тепла на глубины в несколько километров, образуя так называемые гелиотермозоны. Охлаждение земных недр в периоды оледенения приводило к образованию многолетней мерзлоты мощностью до 1–2 км и более. Взаимодействие экзогенного и эндогенного источников тепла может происходить как конвективным, так и кондуктивным путем. Поэтому температурные аномалии наблюдаются на участках вулканических очагов, тектонических и рифтовых зон. Отрицательные аномалии возникают на участках проникновения криопегов, холодных инфильтрационных вод.

Гидрогеоэнергетическое направление. Температурная зональность подземной гидросферы в какой-то мере отражает энергетические возможности подземных вод. Они могут аккумулировать, перераспределять и отдавать энергию в разных ее видах. Подземные воды участвуют в работе своеобразной теплоэнергетической машины, преобразуя полученные от разных источников тепло и энергию: солнечную, тектоническую, мантийную, литогенную, биогенную, криогенную, гидродинамическую, газодинамическую, магматогенную.

Вода может находиться в трех фазовых состояниях – твердом, жидком, газообразном. Фазовые переходы сопровождаются процессами энерго- и массообмена. Лед может образовывать крупные ледяные скопления либо входить в состав мерзлых пород в виде минеральных включений, жил, пластов. Жидкая вода может находиться в широком диапазоне температур, от отрицательных (криопеги) до холодных, горячих и перегретых. В больших пределах колеблется и температура паров.

Оледенение способствует образованию двух типов криогенных пород: сингенетичных и эпигенетических. Породы синкриогенного генезиса занимают верхнюю часть разреза, имеют мощность до 60–80 м на побережье северных морей. До перехода в состояние многолетнемерзлых пород они претерпевают несколько тысяч циклов сезонного промерзания и оттаивания.

Эпикриогенные образования подстилают сингенетичные. Основной этап их образования относится к плейстоцену. Они не успели протаять к концу голоценового оптимума и сформировали зону криогенных пород.

Толща многолетней мерзлоты является своеобразным аккумулятором экзогенной и эндогенной тепловой энергии, приходящей как от Солнца, так и из глубины. Все составляющие радиационного теплового баланса являются величинами переменными и могут определять приходную и расходную части теплового баланса. Эти изменения обычно носят циклический характер: сезонный, годовой, вековой, тысячелетний и др. Причем данные изменения могут иметь астрономическое происхождение (угол наклона плоскости эклиптики и оси вращения планеты, эксцентриситет оси вращения Земли вокруг Солнца, периодическое изменение солнечной активности и др.), а также могут быть обусловлены внутриземными факторами, в первую очередь орогенными, тектоническими, вулканическими, почвенно-растительными и т.п.

Важно отметить, что большое влияние на формирование теплового баланса недр имеют общегеологические факторы, определяющие, прежде всего, влаго-, тепло- и массоперенос в условиях промерзания, оттаивания пород и возникающих при этом фазовых переходов.

Недра могут аккумулировать не только холод, но и тепло. Подземные воды при этом выполняют роль главного аккумулятора и переносчика энергии. Парогидротермы, в частности, используются для получения электроэнергии. ГеоТЭС, работающие на их базе, имеют в настоящее время мощность 10 000 МВт. В нашей стране такие станции

построены на Камчатке и Курилах. Их суммарная мощность равна примерно 70 МВт. Потенциальные геотермальные возможности этого региона оцениваются в 1000 МВт электроэнергии.

Общие прогнозные ресурсы термальных подземных вод России с температурой 40–200 °С оценены для юга и востока страны. При фонтанном способе эксплуатации они равны 1360000 м³/сут. Это соответствует тепловому потенциалу 23300000 Гкал/год. При откачном режиме можно получить больший объем термальных вод – до 19 млн м³ в сутки. При использовании циркуляционных систем и при обратной закачке отработанных термальных вод прогнозные ресурсы возрастают до 7 млрд м³ в сутки [7]. Разведкой освоена лишь небольшая часть прогнозных ресурсов термальных вод. На 1 января 2007 года разведано 63 месторождения термальных вод с эксплуатационными запасами 303 тыс. м³/сут.

Информационное направление. Каждая земная оболочка обладает своим информационным полем. С его помощью запускаются «программы эволюции» каждой из оболочек и их взаимодействие друг с другом. Главная роль в создании и функционировании жизненного пространства принадлежит биосфере и гидросфере. После земных катастроф (столкновения с другими небесными телами, оледенение, резкие изменения климата и др.) эти оболочки формируют обстановку, благоприятную для функционирования живых организмов.

Информация о деятельности подземной гидросферы может быть прочитана по разным показателям: химическому, газовому, изотопному составу подземных вод, по минерализации, плотности и присутствию микроорганизмов, по характеристикам движения, генезиса, режима подземных вод, их состоянию, свойствам, структуре и пр.

Память воды может быть весьма своеобразной. Как показали исследования японского ученого Масару Имото, вода реагирует на музыку, человеческий голос, события, происходящие в мире, изменением своей структуры и образованием своеобразных кристаллов льда. В этом можно видеть нечто мистическое. Ведь подобное всегда реагирует на подобное. Насколько правильными окажутся такие предположения – покажут последующие исследования.

В заключение подчеркнем еще раз, что вода и биота в своем функционировании и развитии тесно связаны друг с другом. Иначе говоря, экологические функции подземной гидросферы являются жизненно важными для нашей планеты. Подземная составляющая

гидросферы вместе со слагающими ее наземной (Мировой океан) и надземной (атмосфера) частями определяет возможность существования жизни на Земле. Кроме того, необходимо отметить, что подземная гидросфера активно участвует в консервации газо-нефтяных ресурсов планеты, определяя ее энергетические возможности на ближайшую перспективу.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вернадский В.И.* История природных вод / под ред. С.Л. Шварцева, Ф.Т. Яншиной. М.: Наука, 2003. 750 с.
2. *Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С., Рейф И.Е.* Перед главным вызовом цивилизации: Взгляд из России. М.: ИНФРА-М, 2005. 224 с.
3. *Карцев А.А., Вагин С.Б., Шугрин В.К., Брагин Ю.И.* Нефтегазовая гидрогеология. М.: Высш. образование, 2001. 258 с.
4. *Кирюхин В.А.* Региональная гидрогеология: учебник. СПб.: СПГГИ, 2005. 344 с.
5. *Кирюхин В.А.* Прикладная гидрогеохимия: учеб. пособие. СПб.: СПГГИ, 2011. 202 с.
6. *Кирюхин В.А., Норова Л.П.* Экологические функции подземной гидросферы // Современная гидрогеология нефти и газа (фундаментальные и прикладные вопросы): тр. Всерос. науч. конф., посвященной 85-летию проф. А.А. Карцева, Москва, 21–23 сент. 2010 г. М., 2010. С. 456–462.
7. *Лукьянчиков В.Н., Лукьянчикова В.Г., Плотникова Р.И.* Ресурсы подземных вод России // Разведка и охрана недр. 2008. № 9. С. 116–125.
8. *Перельман А.И.* Геохимия. М.: Высш. шк., 1979. 323 с.
9. *Плотников Н.И., Карцев А.А., Рогинец И.И.* Научно-методические основы экологической гидрогеологии. М.: Изд-во МГУ, 1992. 62 с.
10. *Трофимов В.Т., Зилинг Д.Г.* Экологическая геология: учебник. М.: Геоинформмак, 2002. 415 с.
11. *Тютюнова Ф.И.* Гидрогеохимия техногенеза. М.: Наука, 1987. 335 с.
12. *Шварцев С.Л.* Гидрогеохимия зоны гипергенеза. 2-е изд., испр. и доп. М.: Недра, 1998. 366 с.
13. Экологические функции литосферы / В.Т. Трофимов, Д.Г. Зилинг, Т.А. Барабошкина и др.; под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2000. 432 с.
14. *Язвин Л.С.* Оценка прогнозных ресурсов питьевых подземных вод и обеспеченность населения России подземными водами хозяйственно-питьевого назначения // Разведка и охрана недр. 2003. № 10. С. 13–19.