

РАСТВОРЕННЫЕ ГАЗЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД АМУРО-ТУНГУССКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

В.В. Кулаков, Д.В. Андреева

ФГБУН Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, ул. Дикопольцева 56, г. Хабаровск, 68000;
e-mail: vvkulakov@mail.ru

Поступила в редакцию 15 мая 2015 г.

В статье рассматриваются результаты исследований растворенных газов подземных вод разных генетических типов, дается интерпретация основных закономерностей их формирования, накопления и движения в разрезе осадочного чехла Среднеамурского артезианского бассейна. На базе новых данных по составу растворенных газов в подземных водах зоны свободного водообмена междуречья Амура и Тунгуски установлены временные изменения концентраций растворенных газов по результатам мониторинга в районе Тунгусского месторождения подземных вод.

Ключевые слова: подземные воды, растворенные газы, Амуро-Тунгусское междуречье.

ВВЕДЕНИЕ

Растворенные газы подземных вод являются продуктами взаимодействия биогеохимических процессов при инфильтрации атмосферных осадков в горные породы и геологических процессов преобразования состава вод и газов, происходящих в недрах. Спектр и разнообразие растворенных газов в подземных водах обусловлены литологическим (органоминералогическим) составом пород и особенностями тектонических процессов в регионе.

Среднеамурский артезианский бассейн, расположенный в среднем течении р. Амур на территории России, входит в состав единого Саньцзян-Среднеамурского артезианского (осадочного) бассейна [9, 16], юго-западная часть которого расположена в Китае (рис. 1). Поверхность бассейна – сильно заболоченная равнина с абсолютными отметками 28–64 м, осложненная низкогорными и холмисто-увалистыми поднятиями, в пределах которых на дневную поверхность выходят породы фундамента.

Территория Приамурья входит в провинцию железосодержащих, марганецсодержащих и кремнийсодержащих пресных подземных вод с низкими концентрациями фтора [12, 18].

Особенности формирования химического состава подземных вод Амуро-Тунгусского междуречья зависят от восстановительной обстановки в чехле Среднеамурского артезианского бассейна. Уже первый от поверхности земли водоносный горизонт характеризуется отсутствием зоны кислородсодержащих вод,



Рис. 1. Расположение Среднеамурского артезианского бассейна

1 – Среднеамурский артезианский бассейн, 2 – характеризуемые участки (1 – Мостовой участок Хурбинского месторождения подземных вод, 2 – Тунгусское месторождение подземных вод), 3 – государственная граница Китая и России.

отрицательными значениями окислительно-восстановительного потенциала, наличием анаэробных микроорганизмов, участвующих в различных биогеохимических процессах, наличием метана, сероводорода и повышенными концентрациями растворенного углекислого газа в подземных водах.

Известно, что информативными биогеохимическими маркерами источников органических веществ и процессов их преобразования в подземных водах являются газообразные углеводороды и сероводород [2, 13, 20]. Поэтому исследования содержания растворенных газов в подземных водах Амуро-Тунгусского междуречья являются актуальными и необходимыми для обеспечения высокой степени надежности и безопасности питьевого водоснабжения населения.

Основная цель настоящей работы состояла в систематизации известных геологических материалов с анализом новых данных по распределению и условиям формирования растворенных газов в подземных водах осадочного чехла Среднеамурского артезианского бассейна и, главным образом, в зоне активного водообмена междуречья Амура и Тунгуски.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предметом исследования в представленной статье являются растворенные газы подземных вод водоносного плиоцен-четвертичного озерно-аллювиального горизонта. На основе мониторинга химического, микробиологического и газового состава подземных вод района Тунгусского месторождения, расположенного в междуречье Амура и Тунгуски, проведен анализ новых данных по распределению и уточнены условия формирования растворенных газов зоны свободного водообмена в осадочном чехле Среднеамурского артезианского бассейна.

В междуречье рек Амур и Тунгуска в 2000 г. разведано Тунгусское месторождение подземных вод для водоснабжения г. Хабаровска [17]. В этом районе в 2011–2012 гг. сооружена наблюдательная сеть мониторинга подземных вод (рис. 2). Ярусные кусты из 3-х компактно расположенных скважин оборудованы фильтрами на разные интервалы глубин водоносного горизонта с рабочей частью фильтра, длиной 2 м, который установлен на глубинах порядка 15, 30 и 45 м в каждом пункте наблюдения (рис. 3).

При мониторинге качественного состава подземных и поверхностных вод из наблюдательных скважин систематически (4–5 раз в год) отбираются пробы воды и осуществляется гидрохимический и микробиологический анализ, в том числе исследуется состав растворенных газов. Пробы воды из скважин отбираются в конце прокачки наблюдательных скважин погружным насосом GRUNDFOS.

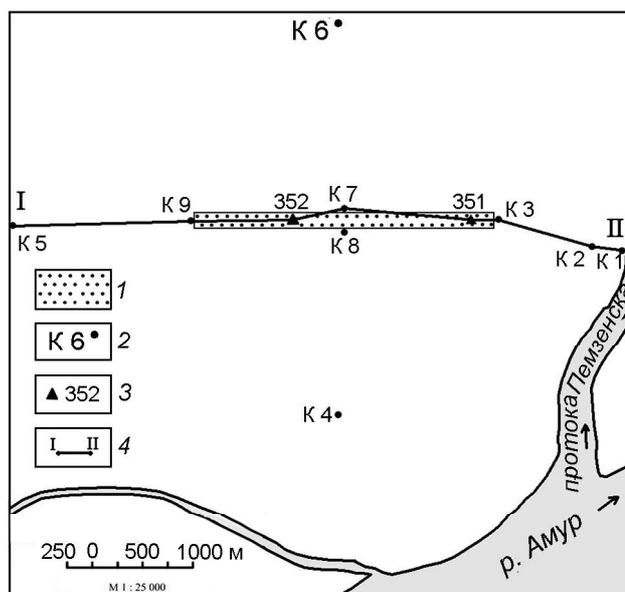


Рис. 2. Схема размещения эксплуатационных и кустов наблюдательных скважин в районе Тунгусского месторождения подземных вод.

1 – расположение эксплуатационных скважин на площадке водозабора, 2 – кусты наблюдательных скважин, 3 – разведочные скважины, 4 – линия гидрогеологического разреза.

Для определения растворенных газов отбор проб воды осуществлялся через шланг в стеклянные сосуды (объемом от 0.02 до 0.5 дм³), которые предварительно несколько раз промывались откачиваемой водой. Через опущенную до дна емкости резиновую трубку набирался второй-третий объем воды таким образом, чтобы на стенках не образовывались пузыри воздуха. В наполненную емкость для консервации добавлялось 0.5 мл хлоргексидина, и она закрывалась резиновой пробкой. Транспортировка водных проб в емкостях для определения растворенных газов осуществлялась в перевернутом состоянии.

Исследования состава растворенных газов начались в конце 2012 г. и выполнялись в лаборатории газогеохимии Тихоокеанского океанологического института (ТОИ ДВО РАН, г. Владивосток). Для извлечения газа из проб воды в этой лаборатории использовался метод вакуумной дегазации на специальной дегазационной установке [19]. После извлечения газ вводился в хроматограф «Кристаллюкс 4000М». Измерялось содержание в воде следующих газов: метан и тяжелые углеводороды (C₂-C₄), углекислый газ, кислород, азот, гелий и водород. Для определения водорода и гелия использовался прибор «Газохром 2000».

С конца 2013 г. определение содержания метана в водных пробах проводится в Центральной химико-

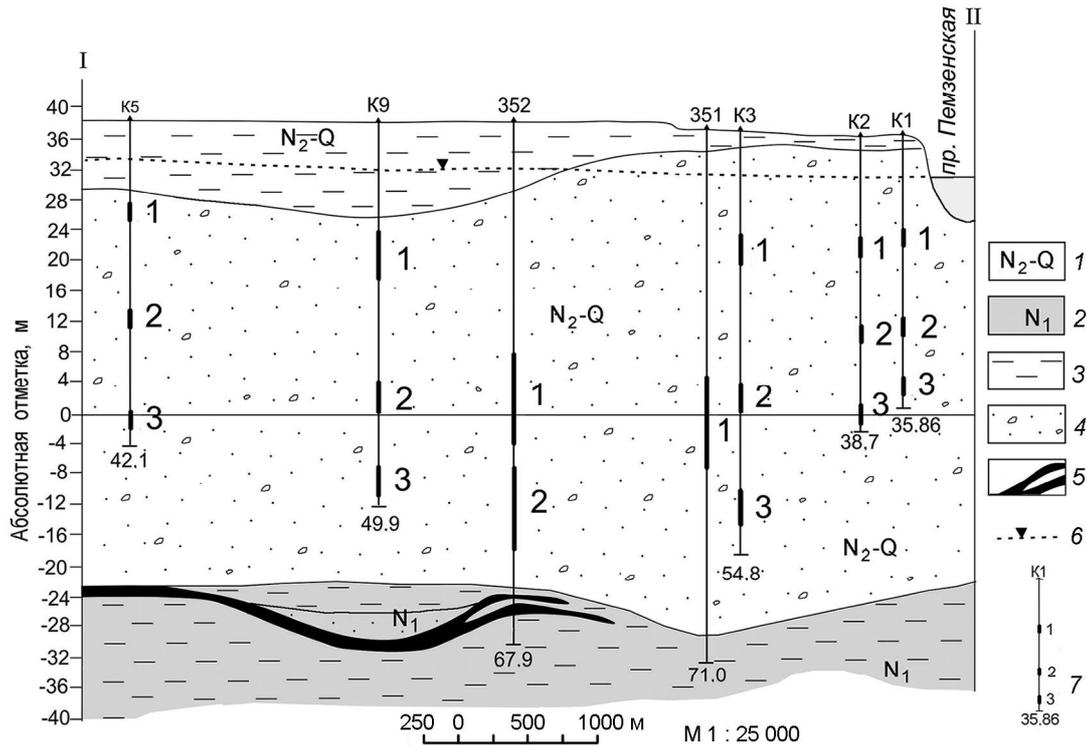


Рис. 3. Гидрогеологический разрез по линии I–II на Тунгусском месторождении подземных вод.

1 – водоносный плиоцен-четвертичный озерно-аллювиальный горизонт; 2 – водоносный эоцен-миоценовый комплекс угленосных отложений; 3 – покровные суглинки; 4 – пески, с гравием и галькой; 5 – бурый уголь; 6 – уровень подземных вод до начала эксплуатации водозабора; 7 – куст скважин: сверху – его номер, снизу – максимальная глубина скважин, м, утолщение – интервал рабочей части фильтров в скважинах (интервал отбора водных проб в разрезе водоносного горизонта: 1 – верхний, 2 – средний, 3 – нижний).

бактериологической лаборатории МУП г. Хабаровска «Водоканал» согласно РД 52.24.512-2002 на газовом хроматографе «Agilent 7890A» (США) с плазменно-ионизационным детектором.

С 2013 г. в подземных водах Амуро-Тунгусского междуречья авторами проводятся исследования содержания сероводорода фотометрическим методом по РД 52.24.450-2010 на спектрофотометре Shimadzu UV-3600 (Япония). Вследствие неустойчивости сероводорода и сульфидов на месте отбора проб воды немедленно осуществляется ее предварительная обработка и консервация растворами диметил-*n*-фенилендиамина и хлорида железа (III).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ
Геологическое строение и гидрогеологические условия

Среднеамурский осадочный бассейн является составной частью Восточно-Азиатского грабенового (рифтогенного) пояса [5, 21–23] и в современном виде представляет собой систему грабенов и горстов, т.е. типичную структуру «хребтов и бассейнов», характерную для областей рифтогенеза.

Фундаментом Среднеамурского артезианского бассейна являются архейско-протерозойские метаморфические и интрузивные комплексы Хингано-Буреинского массива на западе и палеозойско-мезозойские чешуйчато-надвиговые комплексы, сложенные терригенными и вулканогенно-кремнистыми образованиями, на востоке.

Мезозойско-кайнозойский осадочный чехол, суммарной мощностью до 4 км, выполняет многочисленные односторонние ступенчатые грабены, разделенные горстовыми поднятиями. Максимальная глубина грабенов, выполненных кайнозойскими отложениями, по геофизическим данным достигает 2 км [21].

Важным фактором, обуславливающим формирование состава растворенных газов подземных вод, является наличие органического вещества ($C_{орг.}$) в горных породах геологического разреза осадочного чехла и фундамента бассейна. В юрских породах содержание $C_{орг.}$ в среднем составляет 0.17–0.43 %, достигая в аргиллитах 0.74 % [23]. Органический углерод в меловых и кайнозойских отложениях содержится в небольших количествах – от 0.15 до 1.25 % (макси-

мум – в глинистых пластах). По составу органическое вещество относится к сапропелево-гумусовому, в меловых отложениях оно имеет более гумусовый состав.

В чехле Среднеамурского артезианского бассейна выделяются следующие основные гидрогеологические таксоны: водоносный плиоцен-четвертичный озерно-аллювиальный горизонт (N_2-Q); водоносный миоцен-нижнеолейстоценовый базальтовый комплекс (N_1-Q_1), водоносный эоцен-миоценовый комплекс угленосных отложений (P_2-N_1). В ложе и горном обрамлении артезианского бассейна выделяются водоносная архейско-протерозойская зона трещиноватости метаморфических пород (AR-PR), водоносная пермско-нижнемеловая зона трещиноватости осадочных пород (P_2-K_1); водоносная зона трещиноватости разновозрастных интрузивных пород (AR-MZ).

Водоносный плиоцен-четвертичный озерно-аллювиальный горизонт (N_2-Q) развит повсеместно под покровным водоупорным верхнеолейстоценовым–голоценовым аллювиальным и озерно-аллювиальным горизонтом (a-Ia Q_{III-IV}).

Подземные воды относятся к геохимическому типу бескислородных бессульфидных вод. Они имеют невысокую минерализацию (0.2–0.3 г/дм³). Воды гидрокарбонатные со смешанным катионным составом. Содержание свободной двуокиси углерода изменяется от 20–30 до 250 мг/дм³. Водородный показатель подземных вод изменяется от 6 до 7, окислительно-восстановительный потенциал – от -100 до +100 мВ.

Водоносный миоцен-нижнеолейстоценовый базальтовый комплекс (N_1-Q_1). Преобладают трещинные и трещинно-жильные воды в эффузивных образованиях основного состава. Минерализация колеблется в пределах 0.06–0.13 г/дм³. Воды преимущественно слабокислые, с содержанием свободной углекислоты от 3.8 до 48.9 мг/дм³.

Водоносный эоцен-миоценовый комплекс угленосных отложений (P_2-N_1) содержит межпластовые воды эоцен-миоценовых отложений (угленосные отложения головинской, ушумунской, чернореченской и бирофельской свит). Он развит под водоносным плиоцен-четвертичным озерно-аллювиальным горизонтом и изучен до глубины 200–400 м.

Подземные воды комплекса пресные с минерализацией 0.58–0.64 г/дм³. По химическому составу воды гидрокарбонатные натриевые или со смешанным катионным составом, pH изменяется в пределах 7.1–8.9.

Водоносные архейско-протерозойская и пермско-нижнемеловая зоны трещиноватости осадочных пород (AR-PR и P_2-K_1) слагают фундамент артезианского бассейна. По химическому составу воды гидрокарбонатные со смешанным катионным составом, с минерализацией 0.17–0.32 г/дм³.

Водоносная зона трещиноватости разновозрастных интрузивных пород (AR-MZ) фундамента артезианского бассейна. Трещинные и трещинно-жильные воды интрузивных образований формируются в зоне интенсивного водообмена. Наблюдается рост минерализации от 0.01 г/дм³ в пределах интенсивно расчлененных массивов до 0.2 г/дм³ в пределах слабо расчлененных массивов. Соответственно меняется и химический состав вод от хлоридно-гидрокарбонатного натриево-кальциевого до гидрокарбонатного магниево-кальциевого.

Генезис и зональность газов подземных вод

Все природные воды содержат растворенные газы [11, 13]. Поверхностные воды содержат главным образом газы, полученные при контакте с атмосферой, а иногда и газы, поступающие при разгрузке подземных вод из приповерхностных и глубинных зон литосферы по сейсмически активным глубинным тектоническим нарушениям.

Генезис газов в подземных водах определяется условиями, в которых протекают биогеохимические процессы в земной коре в природной системе «газ–вода–порода–органическое вещество» [10, 12, 22]. В направлении от поверхности земли к глубоким частям литосферы прослеживаются три зоны:

Зона окисления, где протекают интенсивные процессы выщелачивания. В пределах горного обрамления бассейна эта зона может прослеживаться на довольно значительную глубину (более 1000 м). Подземные воды этой зоны содержат главным образом азот и кислород помимо других газов из воздуха.

Зона восстановления, где кислород отсутствует и появляются газы биогеохимического происхождения (метан, сероводород, биогенные азот и углекислый газ) [6–8].

Зона метаморфизма, где подземные воды насыщены главным образом углекислым газом, возникающим в процессе метаморфических изменений пород.

Индивидуальные составляющие природных газов в подземных водах могут иметь разный генезис. Главные процессы образования газов в зависимости от их происхождения подразделяются на четыре основных генетических типа: биогеохимические, атмосферные, химические и радиоактивные. В природных водах, как правило, встречается смесь газов, отвечающая минимум двум из указанных генетических типов. В зависимости от количества растворенных газов в подземных водах различаются следующие группы вод, выделенные по преобладанию в составе растворенных газов соответствующих компонентов: кислородно-азотные и азотные (преимущественно атмосферного происхождения), углеводородно-азотные и

азотные (азот и метан преимущественно биогенного происхождения), азотно-углеводородные с незначительной примесью тяжелых углеводородов, углекисло-углеводородные, углеводородно-углекислые, углекисло-азотные, углекислые.

Известно, что источником метана являются породы чехла артезианского бассейна, содержащие $C_{орг}$. Подземные воды, в которых наблюдаются повышенные концентрации углекислого газа, характерны для областей распространения углекислых минеральных вод. Источником углекислого газа не может служить атмосфера [12, 22], так как парциальное давление углекислого газа в ней равно $10^{1.5}$ Па, а в подземных водах значительно выше и в среднем составляет $10^{2.8}$ – $10^{3.2}$. Глубинный источник CO_2 в региональном плане также не может играть существенной роли. Поэтому основным поставщиком CO_2 в водах зоны гипергенеза (в отличие от областей распространения углекислых минеральных вод) являются процессы окисления органического вещества почвенных, подпочвенных горизонтов зоны аэрации и водовмещающих пород геологического разреза.

Характеристика газогидрохимических условий

С учетом изменчивости распределения растворенных газов в подземных водах по площади Среднеамурского артезианского бассейна можно выделить два основных вида участков формирования и разгрузки повышенных концентраций газа:

- нормальный газовый профиль, обусловленный приповерхностным и глубинным формированием метана в разрезе,

- аномальный (локальный) газовый профиль, совпадающий с очагами разгрузки спонтанного газа по раскрытым зонам глубинных разломов и налагающийся на нормальный профиль.

Аномальные концентрации метана могут образовываться благодаря выходам природного газа из-за низкой степени растворимости этого газа в воде.

Зональность газового состава подземных вод Среднеамурского артезианского бассейна изучена недостаточно [16]. Имеющиеся данные свидетельствуют о закономерной смене состава газов с глубиной. Кислород в подземных водах чехла артезианских бассейнов встречается до глубин 100–200 м, в разрезе гидрогеологических массивов – на глубине до 500–700 м. В более глубоких частях других артезианских бассейнов Приамурья (Амуро-Зейский бассейн) кислород исчезает, сменяясь азотом, и на глубинах более 1000 м заменяется на метан. Общий характер зональности газового состава подземных вод, по-видимому, сохраняется во всех артезианских бассейнах, но глубина залегания границ между зонами может из-

меняться. В гидрогеологических массивах под зоной кислородно-азотных вод растворенный азот преобладает в подземных водах, циркулирующих на глубинах 2–3 км, о чем свидетельствует состав газов термальных источников Приамурья [4, 18].

Основной состав газов зоны аэрации формируется за счет газов преимущественно атмосферного (воздушного) происхождения.

Среднеамурский осадочный бассейн находится в условиях отсутствия или малой интенсивности газообмена подземных вод с атмосферой из-за заболоченности. При отсутствии или ограниченном доступе кислорода воздуха, наличии повышенных количеств органического материала в торфянистых почвах и породах зоны аэрации в верхней части водовмещающих пород создается восстановительная обстановка, связанная с деятельностью анаэробных микроорганизмов. Активизация процессов анаэробного окисления органических веществ в подземных водах приводит к накоплению в них восстановителей, что вызывает снижение окислительно-восстановительного потенциала. При этом основным газом, образующимся под действием бактерий, становится углекислый газ, метан и сероводород.

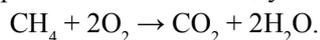
Концентрация растворенных газов в подземных водах зависит как от состава находящихся с ними в контакте свободных газов, так и от их коэффициентов растворимости. В связи с тем что растворимость N_2 , CO_2 , CH_4 различна, неодинаковы и составы свободного и находящегося с ним в равновесии растворенного газа. Растворенный газ подземных вод, по сравнению со свободным, всегда будет существенно обогащен CO_2 , коэффициент растворимости которого гораздо выше, чем у N_2 и CH_4 [13]. Поэтому основная часть CO_2 , образующегося в результате анаэробных процессов окисления органических веществ, находится в подземных водах в растворенном виде, в то время как метан при интенсификации процессов окисления органики может в значительных количествах выделяться в свободной форме.

На Мостовом участке Хурбинского месторождения подземных вод (рис. 1) «залповые» выбросы метана из эксплуатационных скважин, сопровождаемые горением газа, наблюдались неоднократно [9]. Кроме того, наблюдался газовый кольматаж одновременно нескольких водозаборных скважин при эксплуатации.

В пос. Уссурийский (г. Хабаровск) в скважине № 964, глубиной 332 м, вскрывшей угленосные отложения водоносного эоцен-миоценового комплекса и водоносной пермско-меловой зоны трещиноватости (песчаники, аргиллиты и глинистые сланцы), неоднократно наблюдались выбросы горючего газа [16].

Состав растворенного газа: азот (48 %), метан (25 %), двуокись углерода (21 %).

Колебания уровня подземных вод на участках водозаборов приводят к поступлению атмосферного кислорода в зону аэрации и насыщению этим газом подземных вод. В результате анаэробного окисления органических веществ, главным образом, образуется метан с небольшой примесью CO_2 и N_2 , а в условиях доступа кислорода – CO_2 [2, 6]. Поэтому при снижении уровня подземных вод будет происходить осушение водовмещающих пород и соответственное увеличение мощности зоны аэрации, а процессы окисления органических веществ в нижней части зоны аэрации и в верхней части водовмещающих отложений будут происходить более интенсивно. Окисление органических веществ будет способствовать образованию двуокиси углерода, которая, растворяясь в подземных водах, будет снижать их pH и приводить к росту концентрации иона Fe^{2+} . Дополнительным источником поступления в подземные воды двуокиси углерода может быть процесс окисления метана под воздействием гетеротрофных метанооксиляющих бактерий, который описывается следующим уравнением:



Увеличение содержания CO_2 в подземных водах на водозаборах в период ввода их в эксплуатацию подтверждено наблюдениями на Мостовом участке [9].

Повышенные концентрации метана, фиксируемые в подземных водах, по-видимому, приурочены к зонам глубинных разломов.

Растворенные газы Амуро-Тунгусского междуречья

Тунгусское месторождение подземных вод [14–16] расположено в центральной части Среднеамурского артезианского бассейна. Основной водоносный горизонт в плиоцен-четвертичных аллювиальных отложениях приамурской свиты на исследованной площади развит повсеместно (рис. 2, 3). Водовмещающими породами являются пески разнотерные с гравием и галькой с прослоями глинистых песков и алевролитов. Мощность водоносного горизонта колеблется в пределах 40–50 м. С поверхности залегают покровные суглинки мощностью 5–7 м. Подстилается водоносный горизонт приамурской свиты миоценовыми глинами и аргиллитами ушумунской свиты. Подземные воды горизонта слабонапорные или безнапорные. Глубина залегания уровня подземных вод колеблется от 5 до 7 м. По данным многолетних режимных наблюдений установлена активная связь речных и подземных вод.

Подземные воды Тунгусского месторождения имеют обычный состав для южных районов Дальне-

го Востока: воды гидрокарбонатные натриевые, мало минерализованы (до 200 мг/дм³). Качество воды соответствует нормативным требованиям к питьевым водам, за исключением повышенных концентраций железа общего и марганца, содержания которых превышают нормативные требования, соответственно, в 80 и 15 раз. Температура воды по сезонам года практически не меняется и составляет 5.0–6.5 °С. Аномальным показателем является очень низкое значение величины pH, находящееся в диапазоне 5.8–6.1. В вертикальном разрезе и по площади химический состав подземных вод существенно не меняется, за исключением изменения содержания железа и марганца и некоторого роста концентрации кремния с глубиной. Содержание свободной двуокиси углерода в подземных водах изменяется от 120 до 220 мг/дм³, концентрация агрессивной уголекислоты достигает 55–90 мг/дм³.

Основные особенности формирования химического состава подземных вод Тунгусского месторождения зависят от восстановительной обстановки, что приводит к накоплению повышенных концентраций железа и марганца. Подземные воды Тунгусского месторождения, по С.Р. Крайнову и др. [10–12], относятся к геохимическому типу бескислородных бессульфидных вод.

Первые данные о составе растворенных газов в подземных водах междуречья Амура и Тунгуски получены при разведке Тунгусского месторождения подземных вод в 1997–2000 годах [17]. Состав растворенных в подземных водах газов, изученный в период разведки: CO_2 – 68–80 %, N_2 – 16–26 %, CH_4 – 0.7–1.9 %, объем газов составляет 66–110 см³/дм³ (табл. 1). Концентрации метана и уголекислого газа в воде большинства скважин показали сходные высокие значения. Содержания метана достигают 0.14–0.86 мг/дм³. Количество уголекислого газа в воде большинства скважин колеблется от 59 до 138 мг/дм³. Спонтанных выделений газа при опробовании гидрогеологических скважин этого месторождения не наблюдалось.

Опытно-промышленные испытания технологии по обезжелезиванию подземных вод в пласте в 1993–2000 гг., выполненные в районе Тунгусского месторождения и на других участках Среднеамурского артезианского бассейна [14, 17], показали, что даже при закачке аэрированной воды в водоносный горизонт (с концентрацией растворенного кислорода порядка 10–12 мг/дм³) очень быстро весь кислород адсорбируется водовмещающими породами и расходуется на окислительные процессы.

В период мониторинга подземных вод (2012–2014 гг.) на Амуре в 2013 г. произошло катастрофи-

Таблица 1. Состав растворенных газов в подземных водах в период разведки Тунгусского месторождения.

№№ п/п	Номер пробы	Интервал установки рабочей части фильтра, м	Дата отбора	Объем выделив- шегося газа, см ³ /дм ³	Состав водорастворенного газа, мг/дм ³			
					N ₂	O ₂	CO ₂	CH ₄
1. Эксплуатационные скважины								
1	30	43.0–58.0	13.04.2000	63.3	35.4	4.2	63.3	0.003
2	101	22.7–34.9; 53.1–58.8	13.04.2000	53.2	26.6	6.8	52.6	0.04
2. Разведочные скважины								
3	351	32.1–44.5	01.06.2000	109.6	25.1	3.6	170.3	0.63
4	351	32.1–44.5	13.06.2000	107.8	21.7	3.5	170.3	1.31
5	351-1	33.1–45.4	01.06.2000	98.1	31.9	7.0	132.1	0.63
6	351-1	33.1–45.4	13.06.2000	105.9	26.9	3.3	158.7	1.29
7	352-1	44.1–56.3	27.07.2000	86.3	26.5	4.1	120.3	0.99
8	352-1	44.1–56.3	07.08.2000	66.0	35.1	1.2	72.7	0.24
9	352-2	43.2–55.6	27.07.2000	98.1	26.0	5.3	142.9	0.91
10	352-2	43.2–55.6	07.08.2000	105.8	27.9	5.3	156.2	0.53
11	352	30.3–42.3	14.08.2000	96.2	24.5	6.2	141.3	0.55
12	352	30.3–42.3	22.08.2000	109.6	29.2	3.6	163.6	0.71
13	352	30.3–42.3	31.08.2000	100.0	25.0	3.4	151.6	0.01
14	352-1	44.1–56.3	31.08.2000	123.7	46.7	9.7	152.6	0.04

ческое наводнение. Уровень поверхностных вод у левого берега р. Амур на пике наводнения (3–4 сентября 2013 г.) над поверхностью покровных отложений составил 0.2–1.0 м. Однако явного влияния наводнения на состав и концентрации растворенных газов не прослежено. Состав растворенных газов в подземных водах Тунгусского месторождения и поверхностных водах р. Амур (протока Пемзенская) в 2013 г. идентичен составу газов в 2012 и 2014 годах (рис. 4, 5).

Концентрация метана в воде большинства скважин колеблется от 0.005 до 1.616 мг/дм³. Кроме того, во всех исследуемых пробах подземных вод из наблюдательных скважин в районе Тунгусского водозабора был обнаружен сероводород.

Сероводород в природных водах является продуктом восстановительных процессов, протекающих при биохимическом разложении органических веществ [1, 3, 8]. Наиболее интенсивно эти процессы протекают в подземных водах и придонных слоях поверхностных водных объектов, характеризующихся слабым перемешиванием в условиях дефицита кислорода. К основным биогеохимическим факторам, влияющим на образование сероводорода в подземных водах, относятся: наличие органических веществ, анаэробные условия, присутствие сульфатов. Концентрация сульфатов в верхнем интервале водоносного горизонта приречного куста К1 в течение сезона изменяется от 5.5 до 7.8 мг/дм³ (табл. 2). В то же время по скважинам куста К6, расположенного в зоне междуречного режима, влияния катастрофического наводнения на биогеохимические процессы и смену окислительно-восстановительных условий в водоносном горизонте не прослежено.

В наблюдательных скважинах куста К1 у Пемзенской протоки зафиксировано закономерное увеличение концентрации метана и сероводорода с глубиной (рис. 3, 4). Также в скважинах приречного куста К1 наблюдается плавное увеличение концентрации углекислого газа с глубиной от 42.3 до 100.6 мг/дм³.

Представляют интерес высокие концентрации водорода (0.046 мг/дм³) и гелия (0.002 мг/дм³) в подземных водах куста К1, свидетельствующие, по-видимому, о поступлении этих газов из фундамента артезианского бассейна по активным зонам тектонических нарушений [19].

В подземных водах всех скважин наблюдается стабильно низкое содержание кислорода – 0.51–2.1 мг/дм³. В воде Пемзенской протоки его количество больше – 1.2–8.9 мг/дм³. Концентрация азота как в речной, так и в подземных водах в среднем близка к фоновому значению (8.7–17.5 мг/дм³). Следует отметить увеличение количества растворенного кислорода и азота во всех пробах в начальный период наводнения в августе 2013 г.

Весной 2014 г. в период ледостава впервые зарегистрировано присутствие метана и сероводорода в поверхностных водах Пемзенской протоки (табл. 3). Это свидетельствует об интенсивных биогеохимических процессах, происходящих в анаэробных условиях, и возрастании разгрузки подземных вод в конце зимней межени в русло реки после катастрофического наводнения.

Тяжелых углеводородов в составе растворенных газов подземных вод почти нет (табл. 4).

Высокие концентрации метана и сероводорода были зарегистрированы в апреле 2013 г. в скважине

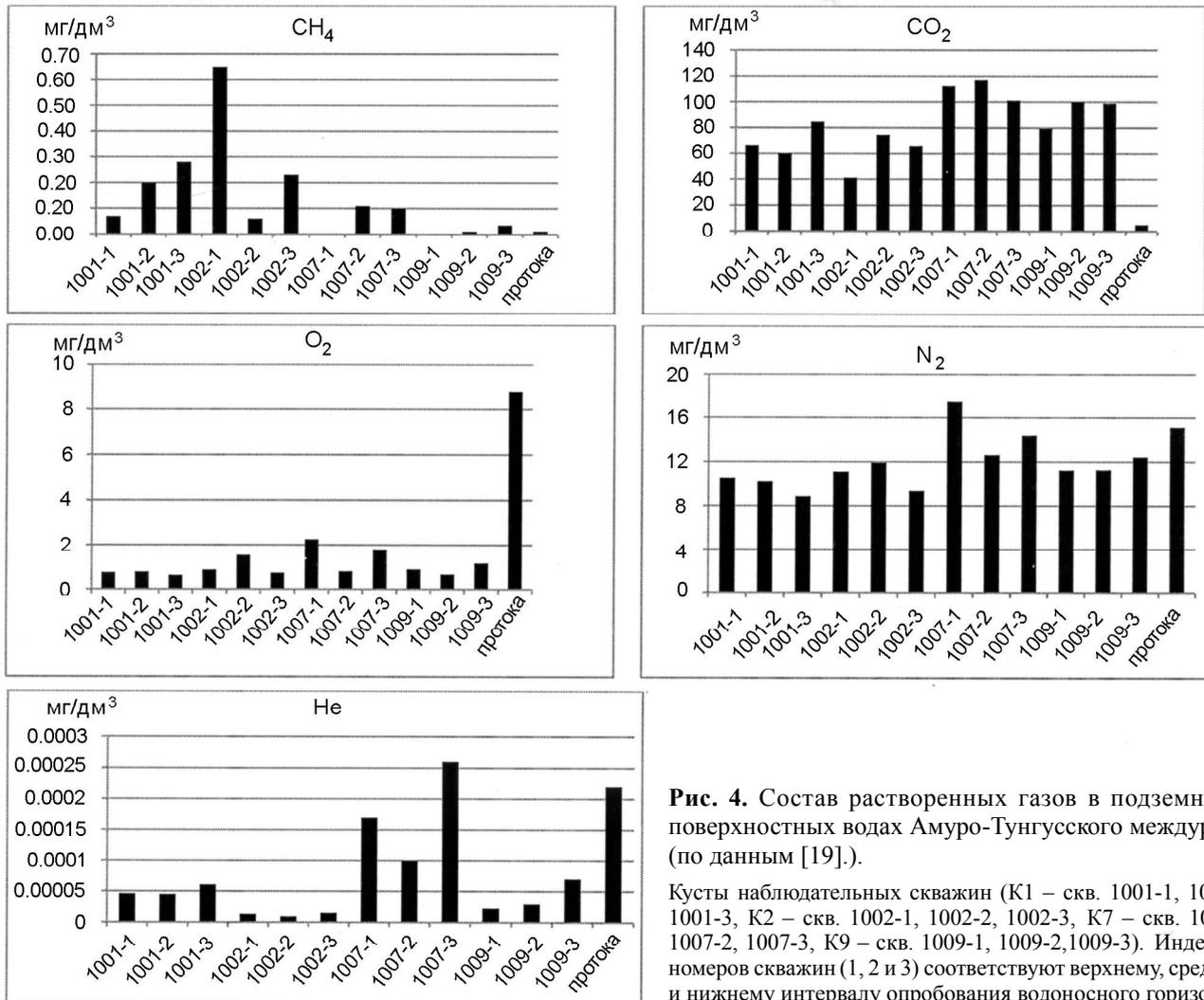


Рис. 4. Состав растворенных газов в подземных и поверхностных водах Амура-Тунгусского междуречья (по данным [19]).

Кусты наблюдательных скважин (К1 – скв. 1001-1, 1001-2, 1001-3, К2 – скв. 1002-1, 1002-2, 1002-3, К7 – скв. 1007-1, 1007-2, 1007-3, К9 – скв. 1009-1, 1009-2, 1009-3). Индексы у номеров скважин (1, 2 и 3) соответствуют верхнему, среднему и нижнему интервалу опробования водоносного горизонта.

Таблица 2. Содержание сульфатов в поверхностных и подземных водах, мг/дм³.

Место отбора	Месяц отбора, 2013 г.			
	апрель	август	сентябрь	ноябрь
Протока	4.9	3.7	5.6	9.3
Пемзенская				
Скважина 1001-1	7.8	5.8	5.5	6.4
Скважина 1001-2	< 2.0	2.9	2.0	3.1
Скважина 1001-3	< 2.0	< 1.0	3.3	1.4
Скважина 1006-1	< 2.0	< 1.0	–	< 1.0
Скважина 1006-2	< 2.0	< 1.0	–	< 1.0
Скважина 1006-3	< 2.0	< 1.0	–	< 1.0

куста К2 (в верхнем интервале водоносного горизонта) (рис. 5). Концентрация CO₂ колеблется от 34.2 до 65.4 мг/дм³ в верхнем интервале, 73.7–99.4 мг/дм³ – в среднем и 65.8–93.3 мг/дм³ – в нижнем.

Максимальная концентрация метана (0.64–0.86 мг/дм³) была отмечена в кусте К4 в верхнем ин-

Таблица 3. Содержание метана и сероводорода в поверхностных водах Пемзенской протоки.

Место отбора	Дата отбора	CH ₄ , мг/дм ³	H ₂ S, мг/дм ³
Пемзенская протока	06.11.2012	0.012	–
	22.04.2013	0.008	0.000
	05.08.2013	0.001	0.000
	24.03.2014	0.011	0.007
	03.06.2014	0.002	0.009
	05.08.2014	0.000	0.005

Примечание. «–» – исследования не проводили.

тервале водоносного горизонта. В среднем интервале его содержание – 0.017–0.037 мг/дм³ и 0.06–0.19 мг/дм³ в нижнем интервале.

Максимальная концентрация сероводорода зарегистрирована в среднем интервале водоносного горизонта (1.82 мг/дм³). Концентрация CO₂ в сква-

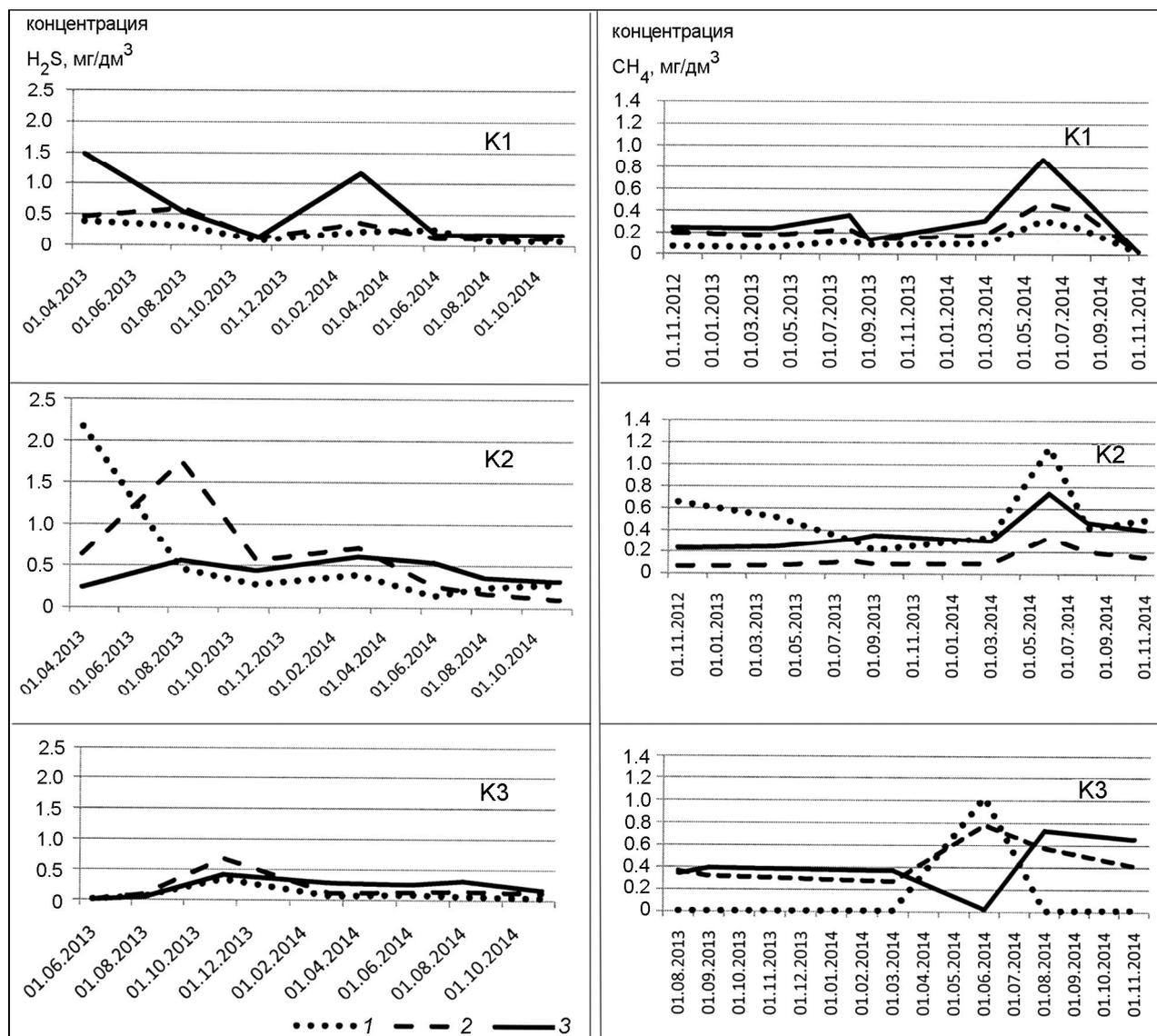


Рис. 5. Содержание сероводорода и метана в подземных водах кустов наблюдательных скважин (K1, K2, K3). Интервалы водоносного горизонта: 1 – верхний, 2 – средний, 3 – нижний.

жинах куста K4 практически одинакова по всей глубине и составляет 67.2–73.1 mg/dm^3 в июне и 94.9–100.8 mg/dm^3 в августе 2013 г.

В наблюдательных скважинах куста K7 в верхнем интервале водоносного горизонта концентрация метана на 2 порядка меньше, чем в среднем и нижнем, количество углекислого газа высокое и почти одинаковое (100.8–116.6 mg/dm^3) на всех интервалах разреза. Содержание гелия высокое в верхнем интервале водоносного горизонта (0.0002 mg/dm^3), меньше почти в 2 раза в среднем и самое высокое в нижнем – 0.0003 mg/dm^3 . Кроме того, высокая концентрация водорода (0.00003 mg/dm^3) зафиксирована в нижнем интервале водоносного горизонта.

Неожиданным и необычным оказалось наличие аномальной концентрации метана (0.12 mg/dm^3) в воде протоки Пемзенской при низкой концентрации углекислого газа (4.7 mg/dm^3). В воде протоки у левого берега зафиксирована аномальная концентрация гелия – 0.0002 mg/dm^3 , что превышает содержание этого газа в 5–10 раз в скважинах, кроме наблюдательной скважины 1007-3 (0.0003 mg/dm^3). Насыщение метаном и гелием как поверхностных, так и подземных вод, кроме микробиологической деятельности, объясняется активными глубинными процессами, происходящими в зонах разломов. В скв. 1007-3 (нижний интервал водоносного горизонта) зафиксировано высокое содержание метана – 0.10 mg/dm^3 , углекислого

Таблица 4. Содержание гомологов метана в подземных водах (мг/дм³).

Скважина	Дата	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈
1001-1	05.08.2013	0.00766	0.00006		
	26.09.2013	0.00112	0.00001	0.00004	0.00018
1001-2	05.08.2013	0.00015	0.00001		
	26.09.2013	0.00003	0.00001	0.00002	0.00020
1001-3	05.08.2013	0.00007	0.00002		
	26.09.2013	0.00001	0.00001		
1002-1	05.08.2013	0.00008	0.00002		
	26.09.2013	0.00002	0.00003		
1002-2	05.08.2013	0.00007	0.00001		
	26.09.2013	0.00001	0.00001	0.00002	0.00002
1002-3	05.08.2013	0.00006	0.00002		
	26.09.2013	0.00001	0.00002		
1004-1	06.08.2013	0.00007	0.00004	0.00002	
1004-2	06.08.2013	0.00003	0.00000		
1004-3	06.08.2013	0.00005	0.00001		
1009-1	06.08.2013	0.00005	0.00001		
1009-2	06.08.2013	0.00005	0.00000		
1009-3	06.08.2013	0.00005	0.00001		

газа – 100.8 мг/дм³ и водорода – 0.00003 мг/дм³, что может свидетельствовать о разгрузке глубинных газов в отложения чехла артезианского бассейна по зонам тектонических нарушений из фундамента.

Важно отметить, что в подземных водах скважин очень высоко содержание углекислого газа. Источником его продуцирования могут быть угленосные слои или примеси углистого вещества в осадочных отложениях, а также возможно поступление углекислого газа из мантии и интрузивных комплексов фундамента Среднеамурского артезианского бассейна по глубинным разломам. То, что зоны разломов существуют и по ним поступают из недр газы, подтверждают высокие концентрации гелия и водорода в воде водоносных горизонтов чехла артезианского бассейна.

ВЫВОДЫ

Подземные воды изученного водоносного плиоцен-четвертичного озерно-аллювиального горизонта Среднеамурского артезианского бассейна в Амуро-Тунгусском междуречьи насыщены углекислым газом, метаном и сероводородом. Они характеризуются также низким содержанием кислорода или его отсутствием. На всей площади исследований подземные воды имеют единый первоначальный источник генезиса растворенных газов – инфильтрация атмосферных осадков с газами воздушного происхождения.

Во всех исследованных пробах подземных вод Тунгусского месторождения весной 2014 г. были обнаружены сероводород и метан с явно выраженной тенденцией увеличения концентрации сероводорода с глубиной. К основным факторам, влияющим на образование углекислого газа, метана и сероводорода в подзем-

ных водах Амуро-Тунгусского междуречья, относятся: наличие органических веществ, анаэробные условия, присутствие сульфатов. Присутствие сероводорода в среде является маркером разрушения органических веществ в бескислородных условиях и активизации восстановительных биогеохимических процессов.

Выявлено, что положение спонтанных выходов метана и углекислого газа на площади Среднеамурского артезианского бассейна определяется узлами пересечений разнонаправленных разрывных нарушений, как правило, составляющих структурный план субмеридиональных разломных зон. Сейсмическая активность разломных зон влияет на ускорение извержений газов, ослабляя зоны продвижения газов к поверхности.

Наличие гелия и водорода в составе растворенных газов подземных вод позволяет сделать вывод о том, что это газы в целом катагенетического происхождения (региональный метаморфизм) с наложением подтока глубинных газов по зонам тектонических нарушений в осадочные отложения чехла артезианского бассейна. При фильтрации через почвы и породы аэрации подземные воды расходуют растворенный кислород на процессы окисления органических веществ, за счет биогеохимических процессов насыщаются углекислотой, метаном и сероводородом при взаимодействии с вмещающими осадочными породами. Кроме того, при латеральном движении по водоносному горизонту подземные воды обогащаются глубинными газами из недр метаморфогенного происхождения (метан, углекислый газ, гелий), разгружающимися по зонам тектонических нарушений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю признательность сотрудникам лаборатории гидрологии и гидрогеологии (ИВЭП ДВО РАН, г. Хабаровск) за отбор проб воды из скважин, сотрудникам лаборатории газогеохимии Тихоокеанского океанологического института (ТОИ ДВО РАН, г. Владивосток) и Центральной химико-бактериологической лаборатории МУП «Водоканал» (г. Хабаровск) за выполнение анализов растворенных газов.

Авторы благодарят рецензентов за конструктивные критические замечания и предложения, позволившие произвести исправления в тексте и доработать статью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева Д.В., Кулаков В.В. Сероводород в подземных водах междуречья Амура и Тунгуски // Экология и безопасность жизнедеятельности города: проблемы и решения: Материалы 4-й региональной науч.-практ. конф. 27–28.06.2014г., г. Хабаровск. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2014. С. 71–75.
2. Беляев С.С. Микробиологическое образование метана в различных экосистемах // Роль микроорганизмов в круговороте газов в природе. М.: Наука, 1979. С.125–137.
3. Беляев С.С., Леин А.Ю., Иванов М.В. Роль метанобразующих и сульфатредуцирующих бактерий в процессах деструкции органического вещества // Геохимия. 1981. № 3. С. 437–445.
4. Богатков Н.М., Кулаков В.В. Анненские термы // Сов. геология. 1966. № 3. С. 153–157.
5. Варнавский В.Г., Малышев Ю.Ф. Восточно-Азиатский грабенный пояс // Тихоокеан. геология. 1986. № 3. С. 3–13.
6. Гальченко В.Ф. К вопросу об анаэробном окислении метана // Микробиология. 2004. Т. 73, № 5. С. 698–707.
7. Гальченко В.Ф., Лейн А.Ю., Иванов М.В. Содержание метана в донных осадках и водной толще Черного моря // Микробиология. 2004. Т. 73, № 2. С. 258–270.
8. Иванников В.И. Сероводород в недрах // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2010. № 10. С. 47–50.
9. Козлов С.А., Архипов Б.С. Особенности формирования химического состава подземных вод плиоценовых и четвертичных отложений Среднеамурской впадины на участках их эксплуатации: Материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (XIV совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока). Иркутск, 1994. С. 57.
10. Крайнов С.Р., Соломин Г.А., Гричук Д.В., Шпак Т.П., Закутин В.П. Геохимия марганецсодержащих подземных вод с околонеutralной реакцией // Геохимия. 1986. № 6. С. 830–844.
11. Крайнов С.Р., Швец В.М. Геохимия подземных вод хозяйственно-питьевого назначения. М.: Недра, 1987. 237 с.
12. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Наука, 2004. 677 с.
13. Крайча Я. Газы в подземных водах. М.: Недра, 1980. 343 с.
14. Кулаков В.В., Кондратьева Л.М. Биогеохимические аспекты очистки подземных вод Приамурья // Тихоокеан. геология. 2008. Т. 27, № 1. С. 109–118.
15. Кулаков В.В., Кондратьева Л.М., Голубева Е.М. Геологические и биогеохимические предпосылки повышенного содержания железа и марганца в воде р. Амур // Тихоокеан. геология. 2010. Т. 29, № 6. С. 66–76.
16. Кулаков В.В. Геохимия подземных вод Приамурья. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2011. 254 с.
17. Кулаков В.В., Стеблевский В.И., Домнин К.В., Тесля В.Г., Херлитциус Й. Опытнo-промышленная эксплуатация пилотной установки очистки подземных вод на Тунгусском водозаборе // Водоснабжение и санитарная техника. 2012. № 7. С. 29–35.
18. Кулаков В.В. Геолого-структурные и геотермальные условия формирования термальных подземных вод Приамурья // Тихоокеан. геология. 2014. Т. 33, № 5. С. 66–79.
19. Обжиров А.И., Шакиров Р.Б., Мальцева Е.В., Гресов А.И., Сырбу Н.С., Окулов А.К. Распределение метана в воде и донных отложениях на восточном сахалинском побережье, шельфе и склоне Охотского моря // Вестн. ДВО РАН. 2012. № 6. С. 32–41.
20. Седлухо Ю.П., Станкевич Ю.О. Исследование процесса биохимической очистки подземных вод от сероводорода // Наука и техника. 2015. № 2. С. 55–61.
21. Среднеамурский осадочный бассейн: геологическое строение, геодинамика, топливно-энергетические ресурсы / Отв. ред. Г.Л. Кириллова. Владивосток: ДВО РАН, 2009. 424 с.
22. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1998. 367 с.
23. Шеин В.С. Геология и нефтегазоносность России. М.: ВНИГНИ, 2006. 776 с.

Рекомендована к печати О.В. Чудаевым

V.V. Kulakov, D.V. Andreeva

Dissolved gases in underwater in the Amur-Tunguska interfluve

The paper considers the results of studies of the dissolved gases in groundwater of various genetic types. Main regularities of their formation, accumulation and movement in the section of the Middle Amur artesian basin sedimentary cover are interpreted. Based on the new data in terms of the dissolved gases composition in groundwater in the zones free from water exchange in the Amur-Tunguska inter fluve, temporal variations of the concentrations of dissolved gases have been determined from the results of monitoring in the area of the Tunguska underwater deposit.

Key words: groundwater, dissolved gases. Amur-Tunguska interfluve.