

УДК 551.481.1

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-5(49-59)

Е. Г. ПЕРЯЗЕВА, А. М. ПЛЮСНИН, С. З. ГАРМАЕВА, Р. Ц. БУДАЕВ, Д. И. ЖАМБАЛОВА

Геологический институт СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
peryazeva75@mail.ru, plyusnin@gin.bscnet.ru, sariuxan@mail.ru, budrin@gin.bscnet.ru, dachima@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД ОЗЕР ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ БАЙКАЛА

Рассмотрено влияние рифтовых процессов на расположение озер на восточном побережье оз. Байкал и на формирование химического состава заключенных в них вод. Определено, что озера находятся в разных геолого-гидрологических условиях. Установлено, что в пределах их акваторий выделяется газ, состоящий в основном из метана и азота, в местах расположения глубинных разломов в свободном газе обнаружены повышенные содержания гелия. Найдены проявления грязевого вулканизма, связанного с разгрузкой метана. Показано, что по разрывным нарушениям в малые озера разгружаются трещинно-жильные воды, которые придают воде своеобразный геохимический облик, а в результате тепляющего воздействия термальных вод сформированы мощные залежи сапропеля. В озерах происходит трансформация химического состава по содовому направлению. В водоеме с замедленным водообменом минерализация вод составляет более 1 г/л. На восточном побережье Южной котловины Байкала разгрузки трещинно-жильных вод не отмечается, химический состав формируется в результате дренирования Кабанского болотного массива, воды относятся к гидрокарбонатному магниевое-натриево-кальциевому типу. В выделениях свободного газа на этой территории преобладает метан.

Ключевые слова: *рифтовые процессы, газ, температура, сапропель, минерализация.*

E. G. PERYAZEVA, A. M. PLYUSNIN, S. Z. GARMAEVA, R. TS. BUDAEV, AND D. I. ZHAMBALOVA

Geological Institute SB RAS, 670047, Ulan-Ude, Sakhyanovoy str., 6a, Russia,
peryazeva75@mail.ru, plyusnin@gin.bscnet.ru, sariuxan@mail.ru, budrin@gin.bscnet.ru, dachima@mail.ru

FEATURES OF THE FORMATION OF CHEMICAL COMPOSITION OF LAKE WATERS ALONG THE EASTERN SHORES OF BAIKAL

We examine the influence of rifting processes on the location of the lakes along the eastern shores of Lake Baikal, and on the formation of chemical composition of the waters contained by them. It is determined that the lakes are in different geology-hydrological conditions. It is established that their water areas liberate gas mainly consisting of methane and nitrogen; increased content levels of helium were discovered in free gas in areas where deep-seated faults occur. Manifestations of mud volcanism associated with methane discharges were observed. It is shown that the faults serve as the vehicle to discharge into small lakes fissure-vein waters which impart a peculiar kind of geochemical appearance to the water, and thick deposits of sapropel were produced under the warming effect of thermal waters. In the lakes there is taking place a transformation of chemical composition along the soda direction. In the water body with a retarded water exchange, the mineralization of the waters exceeds 1 g/L. On the eastern shore of Baikal's Southern Hollow, fissure-vein waters are not discharged, chemical composition is formed as a result of drainage of the Kabanskii bog massif, and the waters refer to the hydrocarbonate magnesium-sodium-calcium type. The emissions of free gas on this territory are dominated by methane.

Keywords: *rifting processes, gas, temperature, sapropel, mineralization.*

На восточном побережье Байкала находится цепочка малых озер, протягивающаяся в северо-восточном направлении. Это хорошо выраженные в рельефе и заполненные значительными объемами воды котловины, расположенные на удалении нескольких километров от берега Байкала. Их удельный водосбор относительно небольшой. Многие из озер имеют разнообразную водную растительность и значительные рыбные ресурсы. Тип воды почти во всех гидрокарбонатный натриевый, в то время как реки в регионе, в том числе впадающие в эти озера, характеризуются гидрокарбонатным, смешанным по катионному составу типом вод с преобладанием кальция. Минерализация разгружающихся на берегах озер источников грунтовых вод составляет 0,2–0,3 г/л, в химическом составе преобладают гидрокарбонат (90–93 %-экв) и кальций (55–65 %-экв). Одно минеральное озеро в рассматриваемой группе имеет содовый химический состав вод.

В статье обосновано влияние Байкальской рифтовой зоны на размещение озерных котловин в указанном районе и на формирование ресурсов и химического состава вод.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Среди наиболее крупных озер восточного берега Центральной котловины Байкала выделяются Арангатуй, Бормашево, Шанталык, Лебяжье, Духовое, Котокель, Дикое, Большое Духовое, Малое

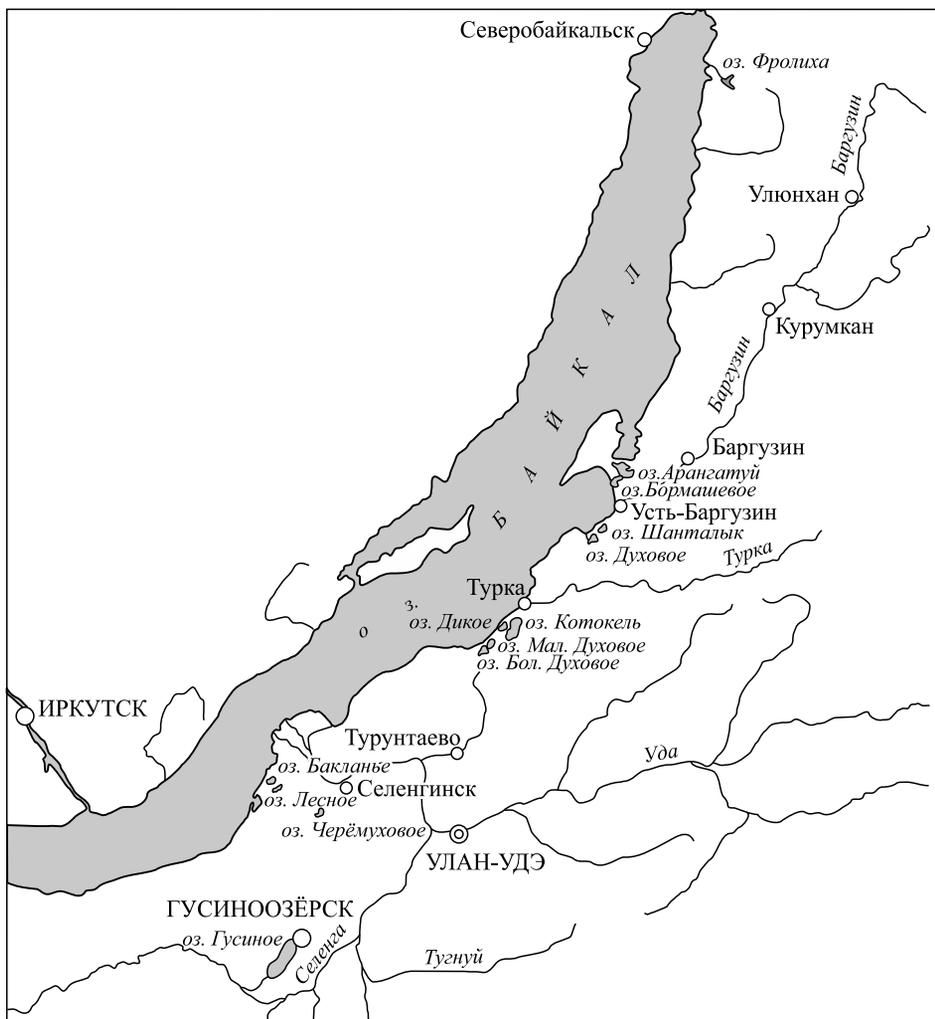


Рис. 1. Схема расположения малых озер на восточном побережье Байкала.

Таблица 1

Соотношение между площадью озер и площадью водосбора

Озеро	Площадь, км ²		Удельный водосбор
	озера	водосбора	
Арангатуй	50,6	353,3	6,98
Бормашево	1,3	2,3	1,7
Шанталык	0,56	9,9	17,6
Духовое	5,84	57,96	9,9
Котокель	62,9	183,0	2,9
Дикое	0,6	3,0	5
Малое Духовое	1,36	4,0	2,9
Бакланье	0,7	2,24	3,2
Лесное	0,3	1,9	6,3
Черёмуховое	0,4	2,25	5,62

Примечание. Удельный водосбор равен отношению площади водосбора к площади озера.

Духовое. На восточном побережье Южной котловины расположены Бакланье, Лесное, Черёмуховое, Никиткино озера (рис. 1). Все они относятся к водоемам с очень малым удельным водосбором, показатель которого (площадь водосбора/площадь озера) изменяется в основном в интервале 1–10 (табл. 1), тогда как средний удельный водосбор озер характеризуется значениями 8–32 [1].

Озера Арангатуй и Бормашево находятся на Баргузинско-Чивыркуйском перешейке в северо-восточной части Центральной котловины Байкала (рис. 2). Площадь водного зеркала оз. Арангатуй 50,6 км², глубина 1–2 м, дно выровненное, заиленное. Абсолютная отметка уровня — 456 м. Питание озера осуществляется за счет стока р. Малый Чивыркуй с Баргузинского хребта и руч. Буртуй с п-ова Святой Нос, а также разгрузки грунтовых и трещинно-жильных вод [3]. Озеро соединено протокой с Чивыркуйским заливом Байкала, куда вместе с водой поставляются биогенные вещества [4]. В водоеме интенсивно развита водная растительность, местами она образует плавучие острова, которые перемещаются ветром по водной поверхности. Иногда такие острова перекрывают выход из озера в Чивыркуйский залив.

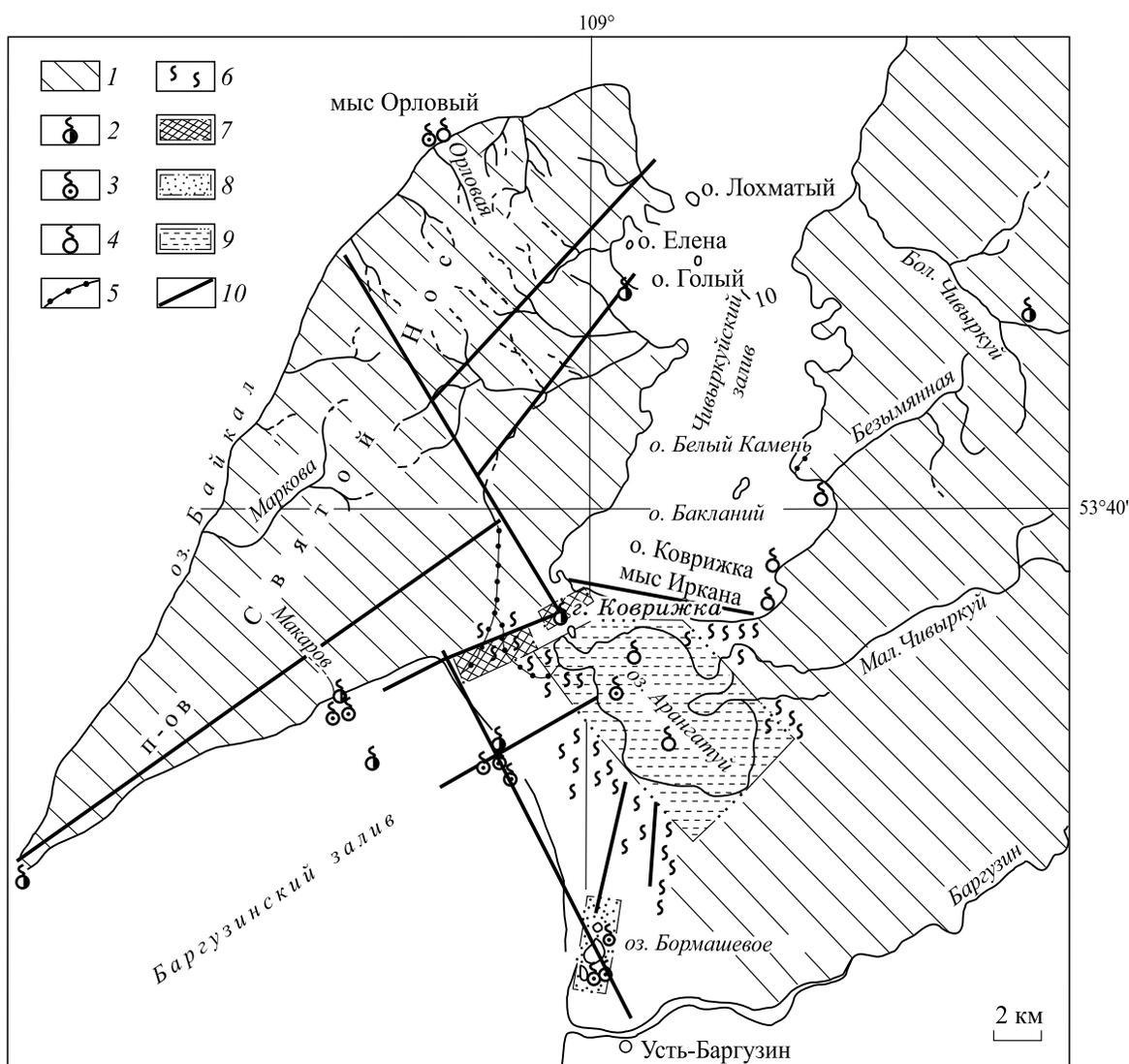


Рис. 2. Геолого-гидрогеологическая обстановка на территории Баргузино-Чивыркуйского перешейка [2].

1 — поле распространения кристаллических пород; 2 — термальные источники; 3 — выходы газов; 4 — пропарины; 5 — поверхностный водоток, не замерзающий зимой; 6 — область распространения сульфатных грунтовых вод; 7, 8 — озера с сульфатным и гидрокарбонатным типом вод соответственно; 9 — озера с придонным слоем сульфатных вод; 10 — разломы.

Площадь зеркала оз. Бормашево 1,3 км², длина 1,5 км, максимальная ширина 1,2 км, средняя глубина 2,2 м. Питание водоема осуществляется атмосферными осадками и грунтовыми водами современных и верхнечетвертичных отложений. Озерная котловина бессточная, разгрузка озерных вод происходит за счет испарения. Уровень воды ниже уровня Байкала на 0,5 м [2]. Летом водоем хорошо прогревается, вследствие чего вода в нем всегда теплая. Здесь имеются отложения сапропеля. По данным разведки, грязевая залежь занимает большую часть озерной котловины и имеет двухслойное строение: верхняя часть (0–0,7 м) сложена сапропелями серого цвета, нижняя (0,7–1,5 м) — сапропелем черного цвета. Средняя мощность грязевой залежи 0,64 м, максимальная — 1,5 м.

Озера на восточном побережье Центральной котловины располагаются в пределах небольших впадин, как правило, ограниченных с двух сторон массивами кристаллических пород.

Озера Шанталык и Духовое находятся у подножия западных склонов хр. Голондинский. Шанталык расположено в 10 км к югу от устья р. Баргузин, в котловине, наклоненной в сторону Баргузинской впадины. Питание водоема осуществляется за счет атмосферных осадков и подземного стока. Через протоку и одноименную реку озеро соединяется с р. Баргузин, его котловина сложена современными четвертичными отложениями аллювиально-озерного генетического типа. Площадь водного зеркала 0,56 км², абсолютная отметка уровня воды 461 м. Берега заболоченные, дно заиленное. Рельеф дна пологий, постепенно погружающийся к центру. Наибольшая глубина составляет около 1 м.

Озеро Духовое расположено в 18 км юго-западнее пос. Усть-Баргузин. Через одноименную реку оно соединяется с Байкалом. Площадь водного зеркала составляет 5,84 км², абсолютная отметка уровня воды — 514 м. Котловина выполнена верхнеплейстоценовыми озерными и голоценовыми аллювиальными отложениями. Берега озера заболочены, дно заилено. Рельеф дна пологий, максимальная глубина — 3,7 м.

Озера Котокель и Дикое находятся у подножия хр. Улан-Бургасы. Котокель имеет площадь зеркала 62,9 км², абсолютная отметка поверхности воды — 461 м, высота над уровнем Байкала — 5 м, максимальная глубина — 14 м. С Байкалом озеро соединяется через реки Исток, Коточик и Турка. Особенностью Котокеля является его теплая вода. Прогрев воды происходит быстро, к началу июня температура поверхностных слоев достигает 15–16 °С. Относительно высокая температура (17–19 °С) держится до конца августа. Озеро богато рыбой. Донные отложения представлены песками, песчаным илом и водорослево-глинистыми и глинистыми сапропелями оливкового, зеленовато-коричневого и зеленовато-бурого цвета мощностью до 4 м, в среднем 2 м (рис. 3). Разведанный участок сапропелевой залежи расположен в пределах Осиновой губы в западной части оз. Котокель. Площадь участка составляет около 500 тыс. м². В водоеме интенсивно развит фитопланктон, общая численность водорослей в слое 0–13 м в августе 2009 г. составила 7,13 млрд кл/л. Вертикальное распределение водорослей в толще было равномерное, максимальные значения численности цианобактерий и эукариотического фитопланктона наблюдались в придонном слое на глубине 13 м [1].

Озеро Дикое располагается в северной части Кикинской впадины в районе пос. Гремячинск. Длина озера 1,6 км, ширина 0,6 км, глубина 1 м, площадь зеркала 0,6 км², абсолютная отметка поверхности воды 459 м. Поверхностного стока в водоем нет, питание осуществляется за счет подземного стока. Возможно, происходит перетекание воды по разлому из Котокеля. Озеро бессточное. Дно заиленное, интенсивно развита водная растительность.

Озера Бакланье, Черёмуховое находятся в пределах глубокой Усть-Селенгинской впадины, которая является суходольной частью Южной котловины Байкала. Бакланье имеет близкую к квадрату форму со стороной 0,8 км. Площадь озера 0,7 км², оно соединено протокой с оз. Лесным и с магистральным каналом, дренирующим болотный массив. Глубина водоема достигает 1,5–2 м. Дно интенсивно заилено, с него периодически выделяется газ. Озеро Черёмуховое имеет вытянутую форму, длинная сторона составляет 0,8 км, короткая — 0,3 км. Глубина достигает 1,5 м, площадь — 0,4 км², дно заиленное. В водоем по каналу разгружаются дренажные воды болотного массива.

Для выявления кайнозойской разломной сети и установления геоморфологических особенностей территории применено дешифрирование космоснимков, результаты которого были подтверждены полевыми наблюдениями. С помощью GPS-навигатора определены географические координаты разрывных нарушений и расположения водопроявлений. Результаты измерений вынесены на космоснимки и сопоставлены с данными дешифрирования, в частности с простираем разрывных нарушений и расположением озер. Для определения содержания микроэлементов в растворе применен метод индуктивно-связанной плазмы, анализ выполнен на приборе ICP MS-XR в Центре коллективного пользования Геологического института СО РАН, газовые пробы проанализированы хроматографическим методом в Научно-производственной фирме «Сибэкосервис». Отбор водных проб произ-

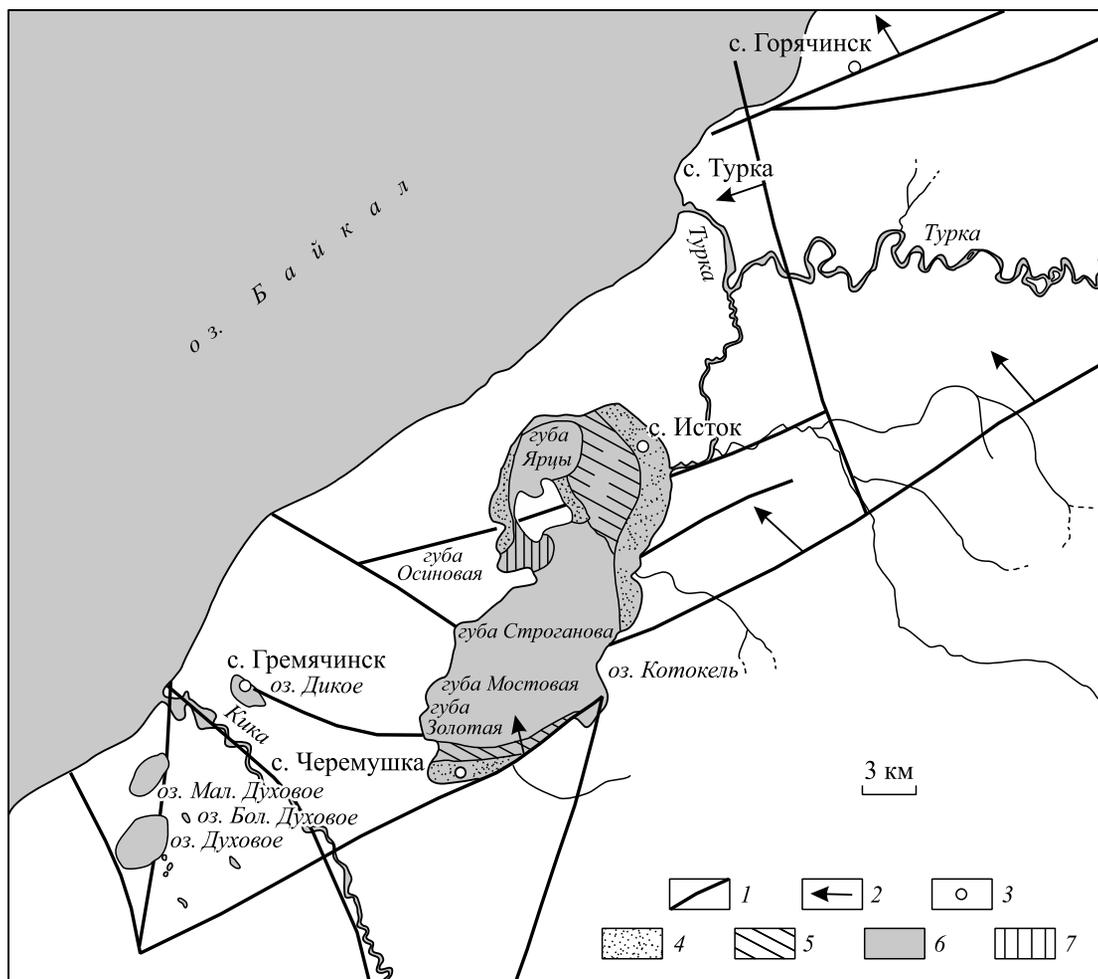


Рис. 3. Размещение озер в Кикинской и Котокельской впадинах.

1 — активные разрывные нарушения; 2 — направление падения сбросов; 3 — места отбора проб воды и свободного газа; 4 — песчаные отложения; 5 — песчано-илистые отложения; 6 — илистые отложения; 7 — месторождения сапропеля.

водился в полипропиленовые пробирки. Проба воды на месте отбора фильтровалась через мембранные фильтры с размером пор 0,4 мкм и подкислялась особо чистой азотной кислотой. Газовые пробы отбирались в стеклянные бутылочки методом вытеснения воды и хранились до анализа под водяным затвором.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА

Вся территория восточного побережья Байкала имеет мелкоблоковое строение, в его пределах выделяются участки с разной интенсивностью неотектонических движений [5]. На Баргузинско-Чивыркуйском перешейке котловины озер связаны с блоковыми подвижками, предопределившими становление перешейка в целом. Блоки пород ограничены разломами северо-западного и северо-восточного направлений, согласно которым и вытянуты котловины рассматриваемых озер.

В междуречье Баргузина и Турки преобладают разломы северо-восточной ориентировки, ограничивающие узкие протяженные блоки. Разломы были заложены в палеозое и в последующем неоднократно обновлялись, имеют сбросовый характер. В кайнозое тектонические движения возобновились и возникла серия мелких депрессий, ориентированных, как и впадина Байкала, в северо-восточном направлении, в том числе Шанталыкская впадина, в пределах которой расположены озера Духовое и Шанталык. От Байкала впадина отделена узким 300-метровым поднятием. Озера примыкают к сбросу

су, ограничивающему Шанталыкскую впадину с северо-запада, по нему же заложено русло р. Шанталык, текущей в северо-восточном направлении и впадающей в р. Баргузин. Также контрастно выражен в рельефе разлом северо-западного простирания, по которому заложено русло реки, вытекающей из оз. Духовое.

Южнее р. Турки до р. Кики рельеф имеет мозаичный характер, ступенчато повышающийся к юго-востоку. Мозаичность обусловлена густой сетью разломов нескольких направлений. Наряду с протяженными северо-восточными разломами большую роль играют разломы северо-западной ориентировки. На участках их сближения и в разломных узлах имеются блоки с амплитудами опускания от 100 до 400 м. С разломами этого направления связано формирование Кикинской и Котокельской впадин, которые представляют собой грабены. Наиболее погружен фундамент Кикинской впадины, его опускание происходило длительное время вплоть до голоцена. Своим северо-западным бортом Кикинская впадина открыта в сторону Байкала, в этом месте располагается устье р. Кики. Юго-восточный бортовой разлом, ограничивающий Кикинскую и Котокельскую впадины, является сбросом с амплитудой опускания северо-западного крыла более чем на 300 м. Котокельская впадина отделена от Байкала узкой низкогорной перемычкой, протягивающейся вдоль побережья от устья Кики до Турки. Суходольное днище Кикинской и Котокельской впадин выполнено комплексом рыхлых осадков аквального, коллювиального и эолового генезиса. При исследовании донных отложений оз. Котокель при помощи георадаров обнаружено нарушение их горизонтального залегания в прибрежной зоне. Возможно, такое переслаивание донных отложений связано с новейшими тектоническими движениями [1].

Озера Бакланье и Черёмуховое расположены на восточном побережье Южной котловины Байкала и находятся в других геолого-тектонических условиях. По геофизическим данным, мощность осадочного чехла здесь достигает 5 км [6]. Тем не менее в пределах Усть-Селенгинской впадины проявляется воздействие тектонических событий, связанных с рифтогенезом, в частности установлено, что разрывные нарушения выражаются в аномальном потоке радона и гелия [7]. В эманациях свободного газа в озерах, болотах, магистральном канале кроме метана фиксируются азот, аргон, гелий, водород [8]. В зимнее время вдоль берега Байкала во льду образуются «пропарины», связанные с выделением газа. Судя по составу газов, они частично поступают из кристаллического фундамента, на котором залегают чехол осадочных пород впадины. Изученные озера находятся на территории заболоченного Калтусного прогиба, и формирование химического состава их вод в большой мере зависит от дренируемого естественными и искусственными водотоками окружающего болотного массива.

Подземные воды восточного побережья оз. Байкал представлены в основном грунтовыми водами аллювиальных отложений, трещинными водами гидрогеологических массивов и трещинно-жильными водами разломов. В аллювиальных отложениях осуществляется подрусовой сток в долинах рек. В котловинах озер выделяется несколько водоносных горизонтов [9, 10]. Трещинные воды формируют ресурсы в пределах гидрогеологических массивов отрогов хребтов Улан-Бургасы и Голондинский [11], находящихся под воздействием рифтовых процессов. Экзогенная трещиноватость в условиях растяжения раскрыта, поэтому поверхностный сток незначителен, грунтовые воды в гидрогеологических массивах находятся на значительной глубине, местами до 150–200 м [12, 13]. Разгрузка их происходит грунтовыми потоком в Байкал и малые озера.

Трещинно-жильные воды в районе исследования связаны с разломами, главным образом сбросового типа [14]. Эти воды разгружаются в виде источников азотных термальных вод (Змеиный, Кулиные Болота, Горячинский, Золотой Ключ) [15, 16]. Поскольку вся территория интенсивно раздроблена разрывными нарушениями, которые в условиях растяжения находятся в раскрытом состоянии, азотные термы присутствуют вблизи поверхности во многих местах [17, 18]. Они могут оказывать непосредственное и косвенное влияние на химический состав поверхностных вод, формирующих ресурсы за счет подземного стока, особенно в местах тектонического опускания коренных пород на большую глубину, что характерно для рассматриваемой территории. По оценке В. А. Голубева [19], скрытая разгрузка теплых вод, формирующихся в интервале глубин от 0,3 до 1–3 км, на один-два порядка превышает выявленную разгрузку в известных термальных источниках. Теплые воды поступают по открытым разрывным нарушениям, которые в большом количестве распространены в пределах кристаллических массивов на восточном побережье Центральной и Северной котловин Байкала. Разгрузка может происходить непосредственно в малые озера, в результате чего могут подогреваться донные отложения и заключенные в них поровые воды. Как было показано ранее [17], химический состав трещинно-жильных вод в этом районе зависит от степени (длительности) взаимодействия воды с горной породой. Воды, относящиеся к сульфатному химическому типу, образуются при продолжительном взаимодействии, а воды, неглубоко проникающие в горные породы, имеют гидрокарбонатный анионный состав.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Особенность озер восточного побережья Центральной впадины оз. Байкал — очень малая площадь водосбора поверхностных вод. К примеру, удельный водосбор наиболее крупного из них оз. Котокель равен всего 2,9. Вероятно, ресурсы водоемов формируются в большей степени за счет подземных вод. Питание оз. Бормашево осуществляется полностью за счет атмосферных осадков и подземных вод современных и верхнечетвертичных отложений. Вода здесь отличается значительной минерализацией и концентрацией хлорида, фторида, кремниевой кислоты и относится к содовому химическому типу. На рис. 2 приведена схема размещения поверхностных и подземных вод в местах их выхода на поверхность на Баргузино-Чивыркуйском перешейке. Видно, что территория интенсивно разбита разрывными нарушениями, по которым во многих местах происходит разгрузка источников термальных вод. На обширной заболоченной площади вблизи озер Арангатуй и Бормашево проявляется — в виде многочисленных теплых мочажин и малых озер — разгрузка термального источника Кулиные Болота. Наблюдаются многочисленные выходы газов, зимой во льду фиксируются пропарины. С п-ова Святой Нос сюда течет поверхностный водоток, не замерзающий зимой. На этой территории выделяется обширная область, где в придонном слое распространены сульфатные грунтовые воды. Имеются малые озера с сульфатным типом вод. Несомненно, термальные воды оказывают влияние и на оз. Бормашево, расположенное в пределах разрывного нарушения северо-западного направления, по которому происходит разгрузка в озеро трещинно-жильных вод. Но в целом термальные воды, вероятно, не играют решающей роли в формировании ресурсов водоема, так как его вода отличается относительно невысокой концентрацией сульфата. Известно, что в анионном составе источника Кулиные Болота сульфат играет более значительную роль, вода источника относится к сульфатно-гидрокарбонатному типу [17]. В чем же причина образования содовых вод в этом озере? По нашему мнению, это следствие сильного испарения из озера теплой воды летом и интенсивного разложения остатков растительности зимой. Оба процесса приводят к увеличению в воде концентрации углекислого газа, гидрокарбонат- и карбонат-ионов, насыщению вод относительно карбоната кальция и высаживанию его из раствора.

Рассмотрим протекающие процессы подробнее. Сезонное отмирание растительности привело к накоплению в озере толщи сапропеля. При разведке месторождения установлено, что грязевая залежь занимает большую часть озерной котловины. Она имеет двухслойное строение: верхняя часть (0–0,7 м) сложена сапропелями серого цвета, нижняя (0,7–1,5 м) сложена сапропелем черного цвета. Средняя мощность грязевой залежи составляет 0,64 м, максимальная — 1,5 м. Как известно, сапропель представляет собой органо-минеральные отложения на дне озер, прудов, которые образуются за длительное время. Основой для них служат остатки живых организмов и водной растительности. Сапропель включает в себя органическую и минеральную составляющие. Органическая образуется путем переработки ее микроорганизмами, интенсивному развитию которых благоприятствуют теплые придонные воды. В верхней части залежи оз. Бормашево сапропель окисленный, т. е. в сложившихся в настоящее время условиях происходит интенсивное окисление органического вещества, в результате чего накапливается один из конечных продуктов процесса — углекислый газ. В сформировавшихся кислотно-щелочных условиях (рН 8,7) он трансформируется в гидрокарбонат- и карбонат-ионы, при взаимодействии карбоната с растворенным в воде кальцием происходит высаживание кальцита, из раствора удаляется значительная доля кальция, магния и возрастает относительная доля натрия, воды приобретают гидрокарбонатный натриевый химический тип. Этот процесс в придонной воде озера протекает и зимой, и летом, так как микроорганизмы активны в теплой воде. Увеличение минерализации происходит в результате испарительного концентрирования, так как у озера нет поверхностного стока. К тому же испарение интенсифицируется за счет подогрева воды. А. А. Дзюба с соавторами [2] отмечали, что уровень озера находится ниже поверхности Баргузинского залива.

Рассмотренные процессы по трансформации химического состава вод наблюдаются и в оз. Арангатуй. Здесь также сложились благоприятные температурные условия для развития водной растительности и животных, озеро богато соровой рыбой, которой необходима теплая вода. Имеются отложения сапропеля. Отличия только в том, что обмен воды в этом водоеме более интенсивный, поэтому минеральное вещество выносится в Байкал и озеро остается пресным.

Гидрокарбонат-анион доминирует и в воде всех обследованных нами озер в междуречье Турка–Кика. Второй по значимости анион — сульфат — обнаруживается здесь в количестве менее 5 мг/л. Водные ресурсы этих водоемов также частично формируются за счет разгрузки теплых трещинно-жильных вод, идет образование сапропеля. В воде и донных отложениях установилась нейтральная и

Таблица 2

Содержание щелочных, редких щелочноземельных и биогенных элементов в воде исследованных озер по данным ICPMS-анализа, мкг/л

Озеро	Li	Rb	Cs	K	Sr	B	Al	P	Mn	Fe
Арангатуй	49,98	0,71	0,02	3243	100	10,5	10	38	2	95
Бормашевое	8,16	3,33	0,03	6579	256	91,9	72	875	20	580
Шанталык	2,91	1,05	0,015	1156	87	5,3	149	40	10	329
Духовое	2,86	2,46	0,012	1904	156	18,5	53	38	342	160
Котокель, с. Исток	6,50	0,80	0,011	1010	93	13,9	44	4	9	518
Котокель, с. Черёмушки	4,60	1,10	0,079	1169	123	16,7	226	55	276	1584
Дикое	0,87	2,38	0,035	3274	62	21,4	25	18	27	88
Черёмуховое	2,82	2,14	0,077		214	5,1	1	41	431	947
Бакланье	3,99	1,82	0,005	2321	145	14,0	5	87	231	1492

слабощелочная среда, в силу чего сформировались благоприятные условия для высаживания карбоната кальция. По этой причине трансформация химического состава воды идет по содовому направлению, из раствора удаляются щелочноземельные элементы и накапливаются щелочные (табл. 2).

Изменение химического состава вод озер по содовому направлению, по нашему мнению, вызвано отопляющим воздействием глубинных трещинно-жильных вод. По анионному составу они гидрокарбонатные, так как имеют невысокую степень взаимодействия с породой. Их температура, вероятно, не так высока, как на Баргузино-Чивыркуйском перешейке, но тем не менее достаточна для развития богатой водной растительности и микроорганизмов, которые перерабатывают остатки органических веществ в сапропель. Нами установлено, что в свободном газе, выделяющемся из донных отложений озер, обнаруживаются довольно высокие содержания азота, что указывает на разгрузку именно трещинно-жильных вод (табл. 3). В разломах эти воды приобретают специфический геохимический облик. В некоторых озерах наблюдаются высокие содержания отдельных микроэлементов (табл. 4). Так, в оз. Духовое отмечены высокие содержания цинка и кадмия. Как показано ранее, различия в микроэлементном составе вод могут быть в значительной степени обусловлены геохимической специализацией рудной минерализации в породах разломов [20]. В данном случае, вероятно, аномалии связаны с окислением и растворением сфалерита. В озерах микроэлементы могут поступать как в результате разгрузки трещинно-жильных вод, так и с поверхностными водотоками, русла которых заложены по разрывным нарушениям. Формирование конкретной ассоциации микроэлементов связано с влиянием разрывного нарушения определенного простирания [20, 21]. В силу того, что на формирование ресурсов и химического состава воды в озерах оказывают влияние разломы разного простирания, в рассматриваемых водоемах наблюдается значительная дисперсия в содержаниях определенных нами микроэлементов (см. табл. 2 и 4).

Таблица 3

Состав свободного газа в пробах, отобранных в водопунктах на восточном побережье Байкала, %

Место опробования	N ₂	Ar	O ₂	CH ₄	CO ₂	H ₂ ·10 ⁻³	He·10 ⁻³
Лемасово, пропарина, залив оз. Байкал	22,57	2,4	0	74,8	0,8	—	—
Сухая, скважина, побережье Байкала	22,91	1,7	0	75,0	0,4	—	—
Кулиные Болота, источник	83,80	—	1,50	13,7	0	0,398	108,0
Горячинский источник	90,50	—	1,10	6,2	1,3	—	45,6
Арангатуйский источник	85,70	—	13,50	0,0002	0,07	0,09	0,292
Арангатуй, озеро	69,50	—	1,00	25,5	3,1	0,57	0,38
Бормашевое, озеро	74,50	—	0,70	22,6	1,4	0,29	3,73
Шанталык, озеро	55,10	—	1,30	43,1	0,005	0,72	0,49
Духовое, озеро	41,07	—	0,76	51,04	6,56	6,39	0,28
Котокель, Исток, озеро	97,35	—	1,21	0,04	0,005	2,66	621,0
Котокель, Черёмушки, озеро	31,28	—	0,04	66,93	1,01	0,98	3,42
Дикое, озеро	37,14	—	0,68	59,69	1,73	2,09	0,24

Примечание. Здесь и в табл. 4: прочерк — нет данных.

Содержание тяжелых металлов и мышьяка (мкг/л) в озерах восточного побережья оз. Байкал

Хим. элемент	Арангатуй	Бормашево	Духовое	Котокель		Дикое	Бакланье	Черёмуховое	Магистральный канал	Байкал
				с. Исток	с. Черёмушки					
V	0,85	6,04	0,10	0,19	0,37	0,10	0,28	0,14	0,30	0,37
Cr	4,15	3,13	0,19	0,69	0,49	0,76	0,11	0,01	0,13	0,18
Co	0,03	0,13	0,41	0,09	0,65	0,097	0,06	0,048	0,072	0,04
Ni	0,59	0,90	1,36	0,59	1,87	1,94	0,36	0,46	0,37	0,21
Cu	2,17	3,70	3,26	7,98	9,27	15,0	0,76	0,74	0,69	0,41
Zn	16,3	12,3	169,0	146,2	90,4	23,0	4,58	2,59	3,10	1,09
Mo	2,51	2,17	0,51	1,94	1,16	10,2	1,59	0,19	1,29	1,31
Cd	0,05	0,049	13,0	0,51	0,52	4,01	0,13	0,06	0,11	0,012
W	4,71	31,03	0,029	0,02	0,05	0,12	0,02	0,014	0,049	0,050
Pb	0,57	4,96	0,55	1,18	2,30	1,46	0,30	0,12	0,20	0,27
U	0,51	0,54	1,87	0,17	0,18	0,063	0,042	0,008	0,180	0,52
As	0,67	3,66	0,39	0,27	0,69	0,96	15,0	7,0	—	—

Наиболее сильное влияние разгрузка глубинных трещинно-жильных вод оказывает на микроэлементный и газовый состав воды в озерах Бормашево, Арангатуй и Котокель. В первых двух отмечены аномально высокие содержания вольфрама, характерные для азотных термальных вод. Причиной накопления вольфрама в термах выступают щелочная среда и повышенные содержания элемента в породах [11]. А в оз. Котокель в свободном газе обнаружены очень высокие содержания гелия, которые превышают даже концентрацию этого газа в термальном источнике Кулиные Болота (см. табл. 3). В пробе газа, отобранной в этом озере в районе с. Исток, в подавляющем количестве присутствует азот, что характерно для азотных термальных вод. На рис. 3 приведена схема размещения активных тектонических нарушений в районе оз. Котокель. Разломы северо-восточного простирания здесь представляют собой сбросы, которые обновились в результате общего вздымания побережья Байкала в голоцене. В сложившихся тектонических условиях перемещения в горизонтальном направлении они испытывают растяжение, и по ним, вероятно, до сих пор в результате изостазии после таяния ледников происходят подвижки между блоками в вертикальном направлении. Сбросы остаются открытыми для движения вод, на глубине они гидравлически связаны друг с другом, так как разделяющие их блоки представляют собой пластины. Вода проникает в эту систему разломов в отрогах хр. Улан-Бургасы, возможно, в долинах рек Зезиванда, Хаим. Глубина проникновения вод предположительно составляет несколько сотен метров, поэтому они имеют невысокую температуру (не более 20 °С). Общее направление движения этих вод — в сторону Байкала. В районе Котокельской и Кикинской впадин, которые являются глубоко опущенными блоками пород, происходит перехват вод и дренаж на поверхность. Наиболее активная разгрузка наблюдается по разлому, ограничивающему данные впадины с юго-востока. А самые глубоко проникшие в недра воды разгружаются по субпараллельным разломам северо-восточного направления, расположенным ближе к Байкалу. Интенсивная разгрузка трещинно-жильных вод отмечается в местах пересечения разломов северо-восточного и северо-западного направлений. Косвенным подтверждением этого процесса в акватории оз. Котокель является расположение песчаных отложений на его дне. В основном дно озера покрыто илом, а в местах предполагаемой нами разгрузки трещинно-жильных вод ил не накапливается, сносится в другие части озера. Согласно М. М. Кожову [22], дно наиболее глубокой части озера — пролива между островом и западным берегом — сплошь песчаное; обширная полоса покрывает дно северо-восточной части и широким языком вдоль восточного берега проникает на юг. По разлому, проходящему под акваторией озера и пересекающему остров, по которому заложено русло р. Исток, вероятно, происходит разгрузка наиболее глубинных и теплых вод. Здесь в газовых эманациях наблюдаются аномальные содержания гелия, азота. Отобранная в этом месте (с. Исток) проба озерной воды резко отличается повышенным содержанием натрия, в том числе и от пробы, взятой в этом же озере в районе с. Черёмушки. На продолжении указанного разлома в западном направлении находится разведенное месторождение сапропеля (Осиновая губа). Все это подкрепляет наше предположение о разгрузке в этом районе теплых трещинно-жильных вод.

По разлому западо-северо-западного направления из оз. Котокель (Золотая губа), скорее всего, происходит подпитка оз. Дикое. Вода в разломе при фильтрации обогащается медью, цинком, кадмием. Разлом сформирован в результате наклона блока пород в северной части Кикинской впадины в юго-западном направлении. Он раскрыт в верхней части и зажат на глубине, поэтому вода из оз. Котокель не уходит глубинным стоком в Байкал, а вблизи поверхности перемещается в оз. Дикое. Эта составляющая питания озера наиболее значима, так как его водосборная площадь небольшая, и тем не менее оно не пересыхает даже в засушливые годы.

Косвенное влияние на состав озерных вод оказывают газовые эманации метана, которые проявляются, в частности, в виде грязевых вулканов на Баргузинско-Чивыркуйском перешейке и в котловине оз. Котокель [4]. Выделения свободного газа также образуют пропарины во льду вдоль восточного берега Байкала и на оз. Арангату; свободный газ выделяется из глубокой скважины в с. Сухая. В газовом составе эманаций доминируют метан и азот. В табл. 3 приведены данные анализа свободного газа, пробы которого отобраны в пропаринах льда Байкала и в некоторых малых озерах. Метан, имеющий биогенное происхождение [23], частично окисляется до углекислого газа, забирая из вод кислород, и способствует формированию вод содового натриевого типа.

На восточном побережье Южной котловины Байкала озёра находятся в совершенно других геологических условиях. На этой территории также протекают рифтогенные процессы, но их влияние сглажено большой мощностью осадочных пород. Разгрузки глубинных, теплых трещинно-жильных вод здесь не наблюдается, вода в озерах постоянно холодная. Микробиологические процессы преобразования органического вещества заторможенные. Углекислого газа образуется мало, щелочноземельные элементы не удаляются из раствора. По химическому составу вода относится к гидрокарбонатному магниевому-натриево-кальциевому типу, в ней доминируют кальций и магний, а доля натрия и калия в катионном составе составляет всего 12–25 %-экв. Определяющее влияние на формирование ресурсов и химического состава воды оказывает заболоченность. В озерах сложилась глеевая восстановительная обстановка, которая обусловлена значительным количеством разлагающихся растительных остатков. В осадках водоемов доминирует гумусовая органика, которая сносится с окружающей территории в результате разложения растительных остатков [24]. В воде мало кислорода, в выделяющемся со дна свободном газе доминирует метан.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На восточном побережье Байкала под воздействием рифтогенных процессов сформировалась цепочка котловин тектонического происхождения, в которых размещаются малые озера, удаленные от побережья на несколько километров. В питании озер, расположенных на побережье Центральной котловины оз. Байкал, частично участвуют теплые трещинно-жильные воды. В результате их отепляющего воздействия сложились благоприятные условия для интенсивного развития биоты, на дне водоемов сформировались сапропелевые отложения. Интенсивное испарение и окислительное разложение органического вещества способствовали трансформации химического состава воды по содовому направлению. Наиболее интенсивные преобразования состава воды произошли в оз. Бормашево, где результатом испарительного концентрирования стало образование минеральных вод. В формировании химического состава воды оз. Котокель проявляется влияние разгрузки глубинных трещинно-жильных вод. В пределах акватории этого озера наблюдается значительная дисперсия в газовом, микроэлементном составе, связанная с влиянием разноориентированных разрывных нарушений.

Озера, расположенные на восточном побережье Южной котловины Байкала, в пределах Усть-Селенгинской впадины, не подвержены отепляющему воздействию за счет разгрузки трещинно-жильных вод. Заключенные в их котловинах воды холодные, по химическому составу относятся к гидрокарбонатному смешанному по катионному составу типу с преобладанием кальция. В газовых эманациях донных отложений преобладает метан. Озера характеризуются ослабленным протеканием биотических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Озеро Котокельское: природные условия, биота, экология** / Отв. ред. Н. М. Пронин, Л. Л. Убугунов. — Улан-Удэ: Изд-во Бурят. науч. центра СО РАН, 2013. — 340 с.
2. **Дзюба А. А., Кулагина Н. В., Абидуева Т. И., Черных А. Л.** Минеральные озера Баргузинско-Чивыркуйского перешейка // География и природ. ресурсы. — 2002. — № 2. — С. 61–67.

3. Дзюба А. А., Тулохонов А. К., Абидуева Т. И., Кулагина Н. В., Черных Л. А. Палеогеографические аспекты формирования соленых озер Баргузинской котловины // География и природ. ресурсы. — 1999. — № 2. — С. 66–73.
4. Пронин Н. М., Пронина С. В. О резистентности окуня и голяна к некоторым инвазиям при кислородном голодании // Труды Бурят. ин-та естеств. наук. Сер. Зоол. — 1977. — Вып. 15. — С. 37.
5. Будаев Р. Ц., Татьков Г. И., Коломиец В. Л. Тектоническое и литологическое строение юго-западной ветви Баргузинского рифта для оценки риска возникновения опасных природных процессов в восточном Прибайкалье // Изв. Самар. науч. центра РАН. — 2012. — Т. 14, № 1 (8). — С. 2036–2039.
6. Нефедьев М. А., Булгаков С. Б. Региональные и локальные аномалии силы тяжести Байкальской рифтовой зоны и проблемы снятия регионального фона // Состояние и перспективы развития минерально-сырьевого и горно-добывающих комплексов Республики Бурятия. — Улан-Удэ: Изд-во Бурят. науч. центра СО РАН, 1999. — С. 120–126.
7. Плюснин А. М., Астахов Н. Е. Эманации газов в Усть-Селенгинской впадине // Основные факторы и закономерности формирования дельт и их роль в функционировании водно-болотных экосистем в различных ландшафтных зонах. — Улан-Удэ: Изд-во Центра мед. профилактики М-ва здравоохранения Республики Бурятия, 2005. — С. 109–111.
8. Исаев В. П. Геохимия нефти и газа: Курс лекций. — Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2010. — 197 с.
9. Дельта реки Селенги — естественный биофильтр и индикатор состояния озера Байкал / Отв. ред. А. К. Тулохонов, А. М. Плюснин. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. — 314 с.
10. Плюснин А. М., Кислицина Л. Б., Жамбалова Д. И., Перязева Е. Г., Удодов Ю. Н. Особенности формирования химического состава грунтовых вод в дельте реки Селенга // Геохимия. — 2008. — № 3. — С. 243–252.
11. Плюснин А. М., Чернявский М. К., Посохов В. Ф. Условия формирования гидротерм Баргузинского Прибайкалья по данным микроэлементного и изотопного состава // Геохимия. — 2008. — № 10. — С. 1063–1072.
12. Пиннекер Е. В., Писарский Б. И., Ломоносов И. С., Колдышева Р. Я., Диденко А. А., Шерман С. И. Гидрогеология Прибайкалья. — М.: Наука, 1968. — 170 с.
13. Писарский Б. И. Закономерности формирования подземного стока бассейна оз. Байкал. — Новосибирск: Наука, 1987. — 158 с.
14. Лунина О. В., Гладков А. С., Шерстянкин П. П. Новая электронная карта активных разломов юга Восточной Сибири // Докл. РАН. — 2010. — Т. 433, № 5. — С. 1–6.
15. Борисенко И. М., Замана Л. В. Минеральные воды Бурятской АССР. — Улан-Удэ: Бурят. кн. изд-во, 1978. — 163 с.
16. Ломоносов И. С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. — Новосибирск: Наука, 1974. — 227 с.
17. Плюснин А. М., Замана Л. В., Шварцев С. Л., Токаренко О. Г., Чернявский М. К. Гидрогеохимические особенности состава азотных гидротерм Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. — 2013. — Т. 54, № 5. — С. 647–664.
18. Бадминов П. С., Мироманов А. В., Оргильянов А. И., Крюкова И. Г., Тарасов И. А., Степаненко А. В. Перспективы поисков термальных вод в Усть-Селенгинском артезианском бассейне // Подземная гидросфера: Материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России. — Иркутск: Изд-во «Географ», 2012. — С. 285–288.
19. Голубев В. А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. — Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2007. — 222 с.
20. Плюснин А. М., Гунин В. И. Природные гидрогеологические системы, формирование химического состава и реакция на техногенное воздействие (на примере Забайкалья). — Улан-Удэ: Изд-во Бурят. науч. центра СО РАН, 2001. — 137 с.
21. Плюснин А. М., Перязева Е. Г. Гидрологические и гидрохимические особенности озер Еравнинской котловины // География и природ. ресурсы. — 2012. — № 2. — С. 67–74.
22. Кожов М. М. Пресные воды Восточной Сибири. — Иркутск: ОГИЗ, 1950. — 367 с.
23. Намсараев Б. Б., Земская Т. И. Микробиологические процессы круговорота углерода в донных осадках озера Байкал. — Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2000. — 160 с.
24. Хажеева З. И., Плюснин А. М. Вынос биогенных веществ с речным стоком бассейна Селенги // Вод. ресурсы. — 2012. — № 4. — С. 425–436.

Поступила в редакцию 25 апреля 2016 г.