

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Барановская Екатерина Ивановна

**ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И
ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ
АРТЕЗИАНСКОГО МЕЖГОРНОГО БАССЕЙНА ХЭЙХЭ
(СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ КИТАЙ)**

Специальность 25.00.07 – гидрогеология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре гидрогеологии геологического факультета
МГУ имени М.В.Ломоносова

- Научный руководитель** – **Питьева Клара Ефимовна**,
доктор геолого-минералогических наук,
профессор, академик РЭА
- Официальные оппоненты** – **Лисенков Александр Борисович**,
доктор геолого-минералогических наук,
профессор, заслуженный деятель науки РФ,
ФГБОУ ВО «Российский государственный
геологоразведочный университет имени
Серго Орджоникидзе» (МГРИ-РГГРУ),
профессор кафедры гидрогеологии
гидрогеологического факультета
- Галицкая Ирина Васильевна**,
доктор геолого-минералогических наук,
ФГБУН «Институт геоэкологии
им. Е.М. Сергеева Российской академии наук»
(ИГЭ РАН), заведующая лабораторией
гидрогеоэкологии
- Голованова Ольга Васильевна**,
кандидат геолого-минералогических наук,
ФГБУН «Геологический институт»
Российской академии наук (ГИН РАН),
старший научный сотрудник лаборатории
седиментологии и геохимии осадочных
бассейнов

Защита диссертации состоится «20» апреля 2018 г. в 14.30 часов на заседании диссертационного совета МГУ.04.01 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, Главное здание МГУ, корпус «А», геологический факультет, аудитория 415.

E-mail: mgu.04.01@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/97645312/>.

Автореферат разослан «6» марта 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук,
доцент



Н.А. Харитонова

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы связана с глобальной проблемой формирования и рационального использования ресурсов подземных вод в аридных регионах, а также деградацией аридных экосистем при антропогенном воздействии на водные ресурсы [Rausch et al., 2012]. В качестве объекта исследований выбран *артезианский межгорный бассейн Хэйхэ*, расположенный в Северо-Западном Китае, освоение территории которого уже привело к негативным геоэкологическим последствиям, а дальнейшее экономическое развитие района обусловлено острой необходимостью решения вопросов устойчивого использования подземных вод в промышленных и сельскохозяйственных целях [Chen et al., 2006; Zhu et al., 2009; Li et al., 2013].

Огромная по площади территория Северо-Западного Китая представляет собой широтно протянувшуюся каменистую пустыню Гоби, меридионально пересекаемую отдельными впадинами. Впадины включают долины рек, которые берут начало в горах разной высотности, обрамляющих их территории с юга, запада и частично с севера. По Н.А. Маринову [1974], в гидрогеологическом отношении рассматриваемая территория относится к *артезианскому бассейну межгорного типа*, именуемая в дальнейшем **АМБ Хэйхэ**. АМБ Хэйхэ сформировался в четвертичное время в пределах депрессии Гоби в результате интенсивного опускания межгорного пространства и одновременно интенсивного поднятия окружающих горных сооружений. В пределах рассматриваемого бассейна расположена одноименная река Хэйхэ, протянувшаяся с юга на север.

АМБ Хэйхэ приурочен к крайней западной части депрессии Гоби, которая в целом, характеризуясь северо-восточным и восточным погружением, обуславливает соответствующую направленность бассейна. Горные окружения бассейна (с юга, запада и севера) являются истоками постоянных и временных водотоков, питающих данный бассейн. Сложное строение АМБ Хэйхэ и подобных ему бассейнов послужило основанием для использования его в качестве полигона для гидрогеологической оценки аналогичных бассейнов.

В настоящее время нижнее течение р. Хэйхэ является районом геоэкологического бедствия, связанного с опустыниванием, региональным снижением уровней подземных вод и деградацией околородных ландшафтов за счет уменьшения стока реки во второй половине 20 и начале 21 века [Wang et al., 2013], что требует разработки региональной системы рационального управления поверхностными и подземными водами района.

Решение задач управления и рационального использования подземных и поверхностных вод бассейна в целом должно базироваться на анализе региональных закономерностей формирования подземных вод, что и определяет актуальность настоящей работы.

Цель диссертационной работы – исследование гидрогеологического строения и анализ формирования химического состава подземных вод АМБ Хэйхэ в связи с их рациональным использованием и необходимостью решения геоэкологических проблем.

В условиях слабой изученности территории АМБ Хэйхэ (и других подобных бассейнов) для достижения названной цели были поставлены **задачи**:

1. Обоснование методики и методов исследований;
2. Установление и уточнение плано-пространственной структуры, границ потока, оценка региональных условий питания и разгрузки подземных вод бассейна;
3. Характеристика химического состава по данным классификационного анализа и гидрогеохимическая типизация подземных вод бассейна;
4. Выявление гидрогеохимической зональности на основе установления источников, факторов и процессов формирования состава подземных вод;
5. Анализ процессов континентального засоления подземных вод и условий формирования вод разной степени засоления по данным опробования и моделирования.

Методика исследований, личный вклад автора. Автор, как аспирант кафедры гидрогеологии МГУ, принимала участие в гидрогеологических исследованиях АМБ Хэйхэ в

рамках гранта РФФИ-КФЕН «Анализ водообмена подземных и поверхностных вод на основе мониторинга и моделирования процессов влагообмена в зоне аэрации в аридных и гумидных условиях», анализируя региональные закономерности формирования подземных вод бассейна. В основу методики обработки исходных данных и интерпретации результатов, в настоящей работе положен *естественно-исторический анализ* [Вернадский, 1960] *фактических геолого-гидрогеологических и ландшафтно-климатических данных*, позволяющий решить задачи изучения гидрогеологического строения и гидрогеохимических условий АМБ Хэйхэ и подобных ему по площадной значимости и сложности бассейнов аридных территорий; при этом широко используется математическое и геоинформационное моделирование.

Практическая значимость работы состоит в:

1. Установлении и уточнении границ потока подземных вод АМБ Хэйхэ;
2. Разграничении территории бассейна на районы с подземными водами, характеризующимися различными гидрогеологическими обстановками, составом, качеством и степенью засоления;
3. Обосновании в плане и разрезе схемы гидрогеохимической зональности, которая может быть использована при планировании водохозяйственных мероприятий.

Научная новизна работы:

1. Впервые дана оценка гидрогеологическому строению и гидрогеохимическим условиям АМБ Хэйхэ, как типовому примеру широко распространенных в Северо-Западном Китае артезианских бассейнов. АМБ Хэйхэ охарактеризован: *а)* по установленной внешней границе потока подземных вод, включающей горные провинции питания подземных вод бассейна и часть пустыни Бадын-Джаран; *б)* с позиций единого водоносного комплекса грунтового типа.

2. Впервые на основе использования гидрогеохимического классифицирования, серии составленных карт и комплексного использования региональных методов исследований с методами моделирования: *а)* охарактеризован химический состав подземных вод АМБ Хэйхэ по компонентам и минерализации в границах выявленных гидрогеологических районов; *б)* оценено распространение подземных вод с различной степенью засоления, с повышенной минерализацией, жесткостью, агрессивностями.

3. Установлено своеобразие *зональности* подземных вод, заключающейся: *а)* в субдолготном направлении (с юго-запада на северо-восток) чередовании зон, что соответствует региональному геологическому погружению бассейна; *б)* в субширотной (с северо-запада на юго-восток) слабой погруженности каждой зоны, обусловленной сменой горных условий Бэйшань пустыней Бадын-Джаран.

По результатам проведенных исследований были сформулированы следующие **защищаемые положения:**

1. На основании региональных исследований и геоинформационного моделирования обоснована внешняя граница единого потока подземных вод АМБ Хэйхэ, направленного от областей питания к региональной для всей территории бассейна разгрузочной впадине на северо-востоке бассейна. В рассматриваемом потоке подземных вод выделены внешняя (горные окружения и пустыня Бадын-Джаран) и внутренняя зона питания, зона транзита и зона разгрузки подземных вод. Зоне внешнего питания принадлежит основная роль в формировании ресурсов АМБ Хэйхэ.

2. АМБ Хэйхэ является в гидрогеологическом отношении единой системой, представленной мощным водоносным комплексом грунтового типа, сложенным рыхлыми терригенными четвертичными породами, залегающими на юрско-меловом (из литифицированных осадочных отложений) фундаменте. Единство условий формирования подземных вод АМБ Хэйхэ определяется влиянием структурно-геологических, климатических и ландшафтных факторов, которые для рассматриваемого бассейна (и подобных ему) имеют особое значение.

3. Комплексный анализ (сочетание региональных исследований с численным моделированием, приемами классифицирования, типизации и др.) позволил выявить особенности гидрогеохимических условий АМБ Хэйхэ, характеризующихся однообразием в разрезе и различием в плане. Главная причина первого – устойчивая направленность тектонического развития, выраженная поднятием гор и опусканием межгорий; второго – разнообразием гидрогеологического строения участков бассейна, особенно питания, разгрузки, что определило разграничение АМБ Хэйхэ на районы, характеризующиеся особенностями в химическом составе, качестве вод; в характере и интенсивности их засоления в пределах районов, миграционных систем и свойственных им процессов, факторов формирования химического состава вод. Полученные результаты позволяют рационально планировать хозяйствование на изучаемой территории.

Апробация работы. Результаты исследований, главные положения, вопросы и проблемы, рассматриваемые в диссертации, изложены в 8 публикациях, в том числе в 4 статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI.

Основные положения работы докладывались на конференциях: Международной научной конференции «Гидрогеология сегодня и завтра: наука, образование, практика» (Москва, 2013); Седьмой международной научной конференции молодых ученых и талантливых студентов «Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность» под эгидой ЮНЕСКО (Москва, 2013); XXI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2014); I Международной летней школе «Вода в геологических процессах» в Китайском геологическом университете, г. Ухань (Китай, 2014); Всероссийских научных конференциях с международным участием «Фундаментальные и прикладные вопросы гидрогеологии нефтегазоносных бассейнов» (Москва, 2010, 2011, 2015); в том числе на совещании в Пекинском университете в г. Пекин (Китай, 2015); Школе-семинаре для молодых ученых, аспирантов и магистрантов «Моделирование гидрогеологических процессов: от теоретических представлений до решения практических задач» (к 90-летию со дня рождения В.М. Шестакова - основателя школы гидрогеодинамики МГУ) (Москва, 2017).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 8 глав с разделами и подразделами, заключения, приложения объемом 232 страницы; содержит 60 иллюстраций, 40 таблиц и список литературы из 137 наименований, 3 электронных интернет-ресурса общего доступа, 2 фондовых.

Благодарности. Автор выражает особую благодарность и признательность своему научному руководителю д.г-м.н., профессору К.Е. Питьевой за неоценимую помощь, поддержку, ценные советы в процессе выполнения и написания диссертационной работы. Также автор выражает глубокую благодарность и признательность заведующему кафедрой гидрогеологии геологического факультета МГУ д.г-м.н., профессору С.П. Позднякову; профессорам д.г-м.н. А.В. Лехову и С.О. Гриневскому за ценные советы и консультации по моделированию. Д.г-м.н., профессору Р.С. Штенгелову, к.г-м.н., доценту М.С. Орлову, д.г-м.н. Н.А. Харитоновой, к.г-м.н., доценту А.В. Корзун, ведущему инженеру Е.С. Максимовой, всем преподавателям и сотрудникам кафедры гидрогеологии геологического факультета МГУ за поддержку, полезные консультации и замечания. За любезно предоставленные данные, ценные советы, конструктивные замечания и рекомендации автор благодарен к.г-м.н., сотруднику института географии и природных ресурсов Китайской Академии наук Ван Пину и профессору, заведующему институтом водных проблем Пекинского университета Джен Чунмао. Автор выражает свою признательность заведующему кафедрой физики и мелиорации почв факультета почвоведения д.г-м.н., профессору Е.В. Шеину за ценные консультации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Физико-географические сведения об АМБ Хэйхэ

АМБ Хэйхэ расположен в северо-западной части Китая (98°00'-101°30' в.д., 38°00'-42°30' с.ш.). Приурочен к депрессии Гоби. Включает протянувшуюся с юга на север реку Хэйхэ. С юга, запада и севера обрамлен горами, с востока пустыней Бадын-Джаран (рис. 1).

Климат аридный. Среднегодовое количество осадков в равнинной части территории бассейна 8 °С, в горных условиях -3, +4 °С. Среднегодовое количество атмосферных осадков в равнинных частях бассейна < 50 мм (минимальное ≈ 25 мм на крайнем северо-востоке). В горах достигает 700 и > мм; в периферийных частях гор уменьшается до 500 мм. Основное количество осадков на высоте > 4000 абс. м находится в форме снежников и ледников, ниже преобладает снег. Многолетняя испаряемость в горах ≈ 700 мм/год; в пределах равнинной части АМБ Хэйхэ доходит до 2000-1500 мм/год. С северо-запада на территорию северной окраины бассейна поступают холодные ветры зимнего среднеазиатского муссона; с юго-востока – ветры теплого влажного азиатского муссона.

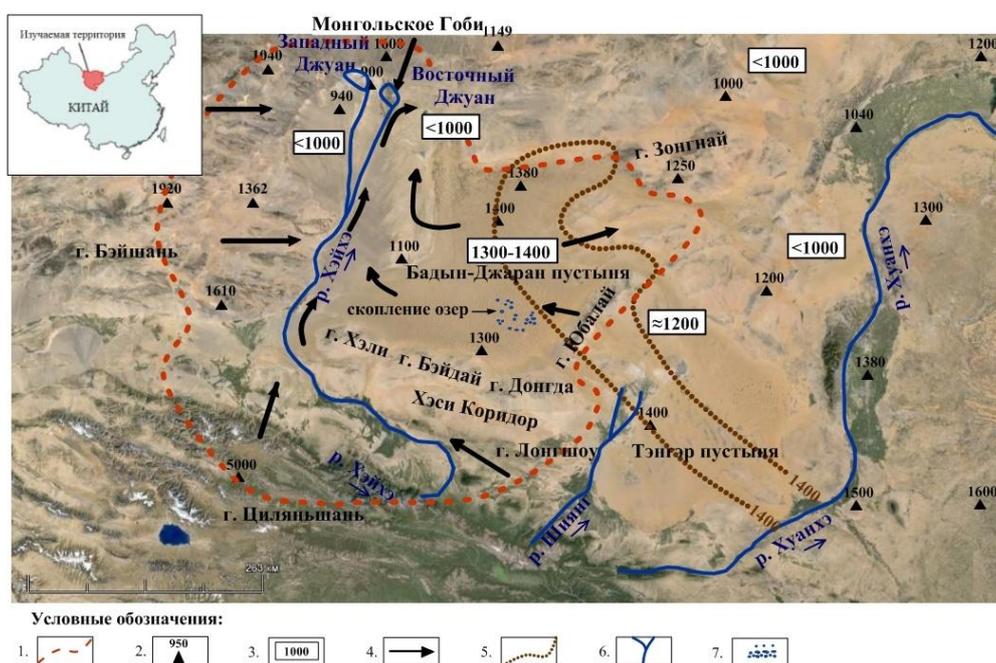


Рис. 1. Обзорная схема расположения АМБ Хэйхэ на территории Северо-Западного Китая [составлено автором по данным Google Планета Земля]:

1 – граница потока АМБ Хэйхэ; 2 – отметка рельефа земной поверхности, абс.м; 3 – среднее значение отметки рельефа земной поверхности, абс.м; 4 – направление движения потоков подземных вод; 5 – водораздел в пустыне Бадын-Джаран; 6 – река; 7 – скопление озер

Рельеф в горах типично горный, но с различными по крутизне склонами. Абсолютные отметки земной поверхности в равнинной части территории бассейна понижаются с юго-запада на северо-восток от ≈ 2000 до 900 м. Вершины гор Цилиньшань достигают ≈ 5500 абс. м; Бэйшань ≈ 2000 абс. м; Лонгшоу до ≈ 1500-1600 абс. м. Пустыня Бадын-Джаран характеризуется отметками рельефа ≈ 1100-1200 абс. м и отдельными горами с высотами до 1500 абс. м (рис. 1).

Гидрография представлена в основном рекой Хэйхэ, которая является одной из крупнейших рек Китая с общей протяженностью 812 км. Она протекает через весь бассейн и заканчивает свое течение в озерах Джуан на северо-востоке территории. Большинство ее притоков сезонные.

Глава 2. Состояние гидрогеологической изученности и методические основы исследований

В целом АМБ Хэйхэ и особенно его северная часть изучены недостаточно хорошо, несмотря на то, что во второй половине 20 века систематические региональные гидрогеологические исследования в Китае проводились по образцу таких исследований в СССР. В настоящее время гидрогеологические исследования АМБ Хэйхэ интенсифицированы и осуществляются ведущими научными организациями и университетами Китая, такими как Китайская Академия Наук, Китайская Геологическая Служба, Пекинский Университет, Китайский Геологический Университет и др. В качестве основных методов исследований используются обоснование гидрогеологических моделей, анализ водообмена с помощью стабильных изотопов и химического состава подземных и поверхностных вод и др. С 2000 года научно-практическое изучение территории АМБ Хэйхэ направлено на оценку взаимосвязи поверхностных и подземных вод с целью рационального управления водными ресурсами региона.

Основное внимание гидрогеологических исследований в Северо-Западном Китае направлено на улучшение экологической ситуации в аридных экосистемах и рациональное использование подземных вод. Поэтому, ключевыми научными проблемами для территории АМБ Хэйхэ являются взаимосвязь подземных вод, водотоков и водоемов, испарение и транспирация подземных вод при их близком залегании от поверхности, обоснование методов управления водными ресурсами. В опубликованных работах указывается, что источники питания подземных вод АМБ Хэйхэ недостаточно охарактеризованы из-за гидрогеологической сложности территории межгорных впадин [Chen et al., 2006]; утверждается, что восполнение запасов подземных вод в бассейне происходит в основном за счет поверхностного стока с горного обрамления [Zhu et al., 2009]; рассматривается роль горного массива Бэйшань в формировании вод бассейна [Yao et al., 2014; Guo et al., 2015]. Освоение пустынь – один из вопросов, которому также уделяется со стороны исследователей серьезное внимание [Gates et al., 2008; Dong et al., 2013; Jiao et al., 2015].

Самыми важными для АМБ Хэйхэ вопросами, остающимися на сегодняшний день, не до конца решенными и дискуссионными, являются: 1) взаимосвязь южного суббассейна с северным; 2) взаимосвязь подземных вод с р. Хэйхэ; изменчивость характера взаимосвязи; участки изменений этой взаимосвязи; 3) источники питания подземных вод и пути их движения от областей питания к разгрузке; 4) виды разгрузки подземных вод и их распределение на территории бассейна; 5) роль возможных зон фильтрации в трещиноватых породах, как областей транзита подземных вод АМБ Хэйхэ за его пределы; 6) оценка соотношения видов разгрузки в балансе подземных вод бассейна.

Методической основой гидрогеологических исследований АМБ Хэйхэ является *естественно-исторический анализ натуральных данных* [Вернадский, 1960], осуществляемый различными приемами систематизации материалов, их обработки и интерпретации, направленный на решение вопросов гидрогеологического строения и гидрогеохимических условий бассейна.

В работе комплексно выполняются региональные исследования с решением частных задач, подкрепляющих и объясняющих те или иные вопросы регионального плана. Так, региональным путем и посредством моделирования (в программе Hydrus-1D) выполнены оценка засоления и установления фонового химического состава подземных вод АМБ Хэйхэ (гидрогеохимическим классифицированием по К.Е. Питьевой). По региональным данным и на основе геоинформационного моделирования обосновывается выделение границы потока подземных вод. В результате разработанных методик, впервые автором составлен комплект карт (геологическая, гидрогеологическая, гидрогеохимическая, глубин залегания, температур, засоления подземных вод и пр.), ряд профилей и графо-аналитических моделей, отражающих различные гидрогеологические и гидрогеохимические условия АМБ Хэйхэ. Широко использованы в работе систематизации разного уровня и различного смыслового содержания. Основным, заключительным и обобщающим приемом систематизации в работе

явилась типизация АМБ Хэйхэ по гидрогеологическому строению и гидрогеохимическим условиям.

Глава 3. Геологические условия АМБ Хэйхэ

Сведения о геологическом строении АМБ Хэйхэ немногочисленны [Ли Сыгуан, 1952; Маринов, 1974; Wang et al., 2015]. Отсутствуют точные представления о территории, обрамляющей бассейн, о его площади, о границах и систематизации основных структурных элементов. Известно, что впадина тектоническая, сформированная вследствие опускания в четвертичное время межгорных участков Земли, вызванного интенсивным и однонаправленным во времени воздыманием гор, окружающих эти участки. В дочетвертичное время характер тектонического развития территории впадины не был постоянным. В домезозойскую эру это была горно-складчатая область; в мезозое – область непостоянных в пространстве и времени тектонических подвижек, усилившихся в кайнозое. Местами образовывались бассейны осадконакопления песчано-глинистого материала.

Согласно составленной автором на основе изученных литературных данных схематической структурно-геологической карте, сложившееся к настоящему времени геологическое строение территории АМБ Хэйхэ представлено *геологическими массивами*: собственно межгорной впадиной; горными системами; пустынями. На основании характеристических показателей, массивы расчленены на *блоки*: собственно впадина на южную и северную депрессии и равнину; горные массивы на блоки Циляншань-Лонгшоу и Бэйшань; пустыни на блоки, представленные пустынями Бадын-Джаран и Гоби.

Характеристика пород. На территории АМБ Хэйхэ распространены породы от самых древних (докембрийских) до четвертичных включительно. В пределах горных условий изучены и имеют выход на поверхность палеозойские и мезозойские отложения, представленные магматическими (граниты, базальты, андезиты и др.), метаморфическими образованиями (гнейсы, кварциты, сланцы, филлиты и др.), осадочными в разной степени метаморфизованными породами (песчаники, мраморизованные известняки, гравеллиты, углистые сланцы, алевролиты и др.). Магматические, метаморфические и осадочные горные породы сложены Са, Mg-содержащими минералами, Na-ми алюмосиликатами и сульфидами. Отложения неогенового возраста представлены слабо метаморфизованными и рыхлыми отложениями (песчанистые глины, песчаники, пески, гравийно-галечниковые образования). **Породы фундамента** – плотные осадочные отложения, преимущественно юрского и мелового возрастов. Наиболее полно изучены для района межгорной впадины четвертичные отложения. Они представлены гравийно-галечниковыми и песчано-глинистыми разностями различного гранулометрического состава.

Тектоника. Активное формирование АМБ Хэйхэ происходило в четвертичное время и представляло собой процессы поднятия и разрушения горных массивов, которые сопровождались преимущественно опусканием внутригорных пространств и их заполнением частицами пород различных размеров, что привело к образованию в пределах межгорной впадины скоплений рыхлых пород значительной мощности. Тектоника территории АМБ Хэйхэ характеризуется наличием разрывных нарушений различной формы и протяженности.

Глава 4. Гидрогеологическое строение АМБ Хэйхэ

Строение бассейна сложное в связи с влиянием на его становление и развитие многих факторов, обусловивших возникновение современной гидрогеологической структуры и гидрогеохимических условий бассейна. Среди вопросов, связанных с гидрогеологическим строением АМБ Хэйхэ, являются вопросы установления внешней границы потока подземных вод, которые связаны с отсутствием в литературных источниках точных сведений о ее положении.

Для установления ее положения были проведены региональные исследования и геоинформационное моделирование, представляющее собой сбор, обработку, преобразование и отображение пространственной координированной геоинформации.

Граница потока АМБ Хэйхэ проведена через водоразделы горных массивов (Циляншань, Лонгшоу, Бэйшань, Монгольское Гоби) и более мелких гор (Юбалай и др.), обрамляющих впадину. Для этого использовалась цифровая информация о рельефе, которая была взята из базы данных геоинформационной системы Global Mapper. На основе этой информации в программе Surfer построена карта рельефа (рис. 2а) и проведена внешняя граница потока подземных вод АМБ Хэйхэ.

Для районирования потока по условиям формирования площадного питания подземных вод использовался подход к оценке питания, базирующийся на теплоэнергетической идее М.И. Будыко [1956, 1971] о соотношении среднемноголетних осадков O , испаряемости E_{max} и суммарного стока R_{tot} в замкнутом водосборном бассейне. Это соотношение для условий Северо-Западного Китая описывается зависимостью Фу [Zhang, 2004]:

$$R_{tot} = w + s = O - Et,$$

$$Et = O \left[1 + \frac{E_{max}}{O} - \left(1 + \left(\frac{E_{max}}{O} \right)^\omega \right)^{1/\omega} \right]$$

где E_t – среднегодовое испарение с поверхности; s среднегодовая интенсивность склонового поверхностного стока, w – среднегодовое площадное питание подземных вод, ω – эмпирический параметр.

Дополнительно к расчетам по зависимости Фу, величина *суммарного стока* может быть оценена на основании эмпирической зависимости Мауэра и Бергера [Wilson, 2004], которая связывает суммарный поверхностный и подземный сток, попадающий в центральную часть межгорных впадин со стороны горного обрамления с осадками:

$$R_{tot} = 2.84 \cdot 10^{-5} O^{2.43}$$

Величина *среднемноголетнего питания* подземных вод может быть рассчитана эмпирической зависимостью Максея-Экина [Wilson, 2004], широко используемой в аридных районах:

$$R_g = 9.0 \cdot 10^{-9} O^{3.72}$$

где R_g – годовой слой подземного стока.

Для применения этого подхода, на основании данных по 23 метеостанциям, расположенным в изучаемом районе, проведена интерполяция среднемноголетних величин осадков и испаряемости с учетом их вертикальной зональности, выраженной в корреляции данных метеостанций с абсолютными отметками. Используя карты осадков и испаряемости по зависимости Фу [Zhang, 2004], была построена карта *суммарного стока*, а по зависимости Максея-Экина [Wilson, 2004] построена карта *среднемноголетнего площадного питания* (рис. 2б).

Полученная карта свидетельствует о том, что наибольшие величины площадного питания (10-100 мм/год) приурочены к максимальным отметкам гор Циляншань, Лонгшоу; меньшие (10-1 мм/год) к их склонам и вершинам гор Бэйшань, Юбалай и др.; минимальные (≤ 1 мм/год) к равнинной территории бассейна. Следовательно, горные окружения являются основными питающими провинциями. Формируется единый поток подземных вод, направленный от областей питания к региональной для всей территории бассейна разгрузочной впадине на северо-востоке. При этом в северном суббассейне в нижнем течении р. Хэйхэ, площадное питание очень слабое.

Для условной оценки общего стока и общей разгрузки подземных вод АМБ Хэйхэ по результатам геоинформационного моделирования и построенных карт суммарного и подземного стока (в основе построения которых лежат карты осадков и испарения), был рассчитан среднемноголетний суммарный объем потенциального суммарного стока, равный $8.4 \cdot 10^7$ м³. Известно, что среднемноголетняя величина испарения с поверхности бессточного озера В. Джуан равна 1450 мм/год, а в среднем его площадь ≈ 40 км² [Li et al., 2017,

Qin et al., 2012]. Тогда, среднегодовое испарение из бессточного водоема составляет $5.8 \cdot 10^7 \text{ м}^3$, что близко к величине суммарного стока.

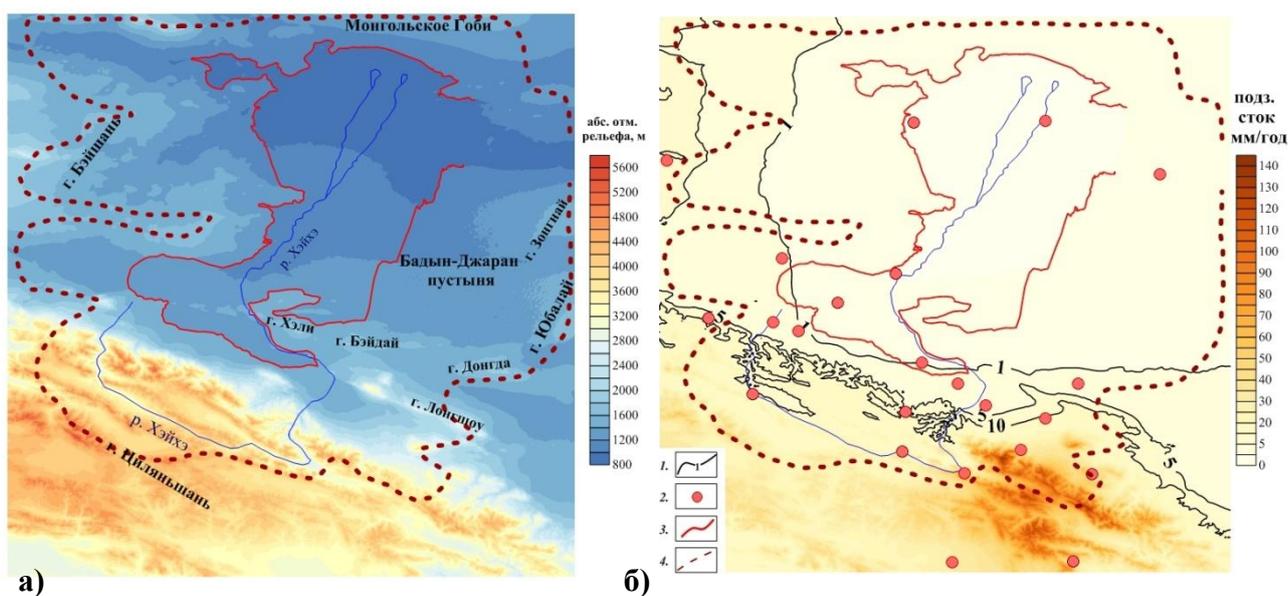


Рис. 2. Карта: а) рельефа; б) потенциального площадного питания АМБ Хэйхэ:
 1 – изолиния потенциального площадного питания; 2 – метеостанция; 3 – граница межгорной впадины;
 4 – граница потока подземных вод

Установленная внешняя граница потока подземных вод и построенные карты потенциального питания и суммарного стока свидетельствуют о том, что основные ресурсы поверхностных и подземных вод формируются за пределами структурных (внутренних) границ АМБ Хэйхэ в пределах питающих провинций.

4.1. Строение бассейна в плане. Рассматривается в немногочисленных работах [Вэй, 2010; Chen et al., 2006; Wang et al., 2013; Yao et al., 2014]. Основным вопросом строения бассейна в плане оказалось обсуждение взаимосвязи северной и южной депрессий территории бассейна, трактуемое об их обособленности [Chen et al., 2006; Li, 2013]. Детальные исследования автора показали, что с точки зрения структуры и генезиса, южная и северная депрессии являются единой цельной структурой, которая по своим свойствам отвечает артезианскому межгорному бассейну. Этот вывод обоснован и подкреплен обширным исследовательским материалом: выполненными автором комплектом карт (рельефа земной поверхности, гидроизогипис), профильными построениями, диаграммами и рядом графиков.

Анализ фактического материала показывает, что для изучаемой территории характерно:

1. Снижение рельефа земной поверхности южной и северной депрессий с юго-запада на северо-восток от предгорий Циляншань с отметками ≈ 2000 абс. м к самой глубокой части северной депрессии (с отметкой ≈ 900 абс. м), что повторяет направленность геологического погружения впадины в целом; **2.** Река Хэйхэ на всем протяжении от истоков в горах Циляншань на высоте ≈ 5500 абс. м до впадения в озеро В. Джуан (≈ 900 абс. м) имеет единую направленность течения, понижение рельефа долины, повышение температуры и минерализации воды; **3.** Подземные воды характеризуются единой направленностью от предгорий Циляншань через южную депрессию и через всю северную депрессию к ее северо-восточному понижению в пределах разгрузочной впадины; устойчивым повышением температур в предгорьях от $11-15 \text{ }^\circ\text{C}$ до $> 20 \text{ }^\circ\text{C}$; повышением минерализации от $< 0.5 \text{ г/л}$ до $\approx 1.0 \text{ г/л}$; сменой HCO_3 горного типа компонентов вод на воды SO_4 и Cl типов в пределах района впадины; **4.** Фильтрационные свойства пород

характеризуются уменьшением в северо-восточном направлении (хотя и незначительным) [Вэй, 2010; Chen et al., 2006].

4.2. Строение бассейна в разрезе. По данным литературных источников, геологические, ландшафтно-климатические и другие условия АМБ Хэйхэ в четвертичное время оставались практически неизменными, что позволило предположить о неизменности в это время и гидрогеологических условий. Обработка литературных и натурных данных позволили получить сведения о практическом отсутствии изменчивости состава и свойств подземных вод в разрезе бассейна, что позволило определить его как *единый, значительной мощности водоносный комплекс грунтового типа*, залегающий на плотных осадочных породах фундамента.

Этот вывод подтверждается следующими положениями:

1. Отсутствием в толще терригенных рыхлых образований АМБ Хэйхэ водоупорных слоев региональной протяженности, которые могли бы послужить обоснованием для *гидрогеологической стратификации* бассейна и практическим отсутствием закономерного распределения геофильтрационных свойств пород в его пределах (рис. 3);

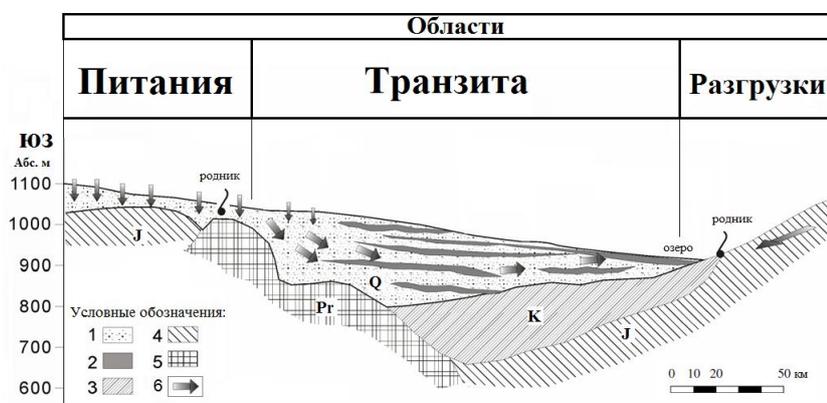


Рис. 3. Гидрогеологический схематический профиль АМБ Хэйхэ [Qin et al., 2012; Wang et al., 2013]:

1-5 – отложения: *1* – пески, галька четвертичного возраста; *2* – глины четвертичного возраста; *3* – аргиллиты мелового возраста; *4* – песчаники юрского возраста; *5* – гнейсы протерозойского возраста; *6* – потоки подземных вод

2. Общей для АМБ Хэйхэ территориальной приуроченностью уровня залегания подземных вод бассейна, к глубинам от ≈ 1 до ≈ 3 м (м и абс. м), независимо от глубин отбора вод на химические анализы;

3. Единством направленности потоков подземных вод бассейна на любых глубинах его разреза от областей питания (Цзяньшань, Лонгшоу, Бэйшань, Юбалай) к региональной для всей территории разгрузочной внутрибассейновой впадине;

4. Единством средней температуры подземных вод, равной ≈ 16 °С в плане и разрезе до глубины 180 м (за исключением питающих провинций);

5. Идентичным химическим составом подземных вод, отобранных из скважин на разных (от < 1 до 180 м) глубинах гидрогеохимических районов АМБ Хэйхэ;

6. Однотипностью химического и солевого составов глубоких подземных вод и вод родников АМБ Хэйхэ в целом (рис. 4);

7. Отчетливым преобладанием высоких прямых корреляционных связей минерализации с анионогенными и катионогенными компонентами подземных вод в целом территории бассейна.

Глава 5. Формирование подземных вод АМБ Хэйхэ

Территория АМБ Хэйхэ в гидрогеологическом отношении по Н.А. Маринову [1974] входит в Центрально-Азиатский гидрогеологический район – область возвышенных равнин и нагорий, отделенных горами. АМБ Хэйхэ расположен в западной части возвышенной Гобийской равнины и находится под влиянием новейших тектонических условий Тибета. Представляет собой мощный водоносный комплекс грунтового типа, возникший на основе интенсивных грабенообразных процессов в четвертичное время и развившийся как

геологическое сооружение, характеризующееся единым строением в разрезе и существенной гидрогеологической неоднородностью в плане (рис. 3).

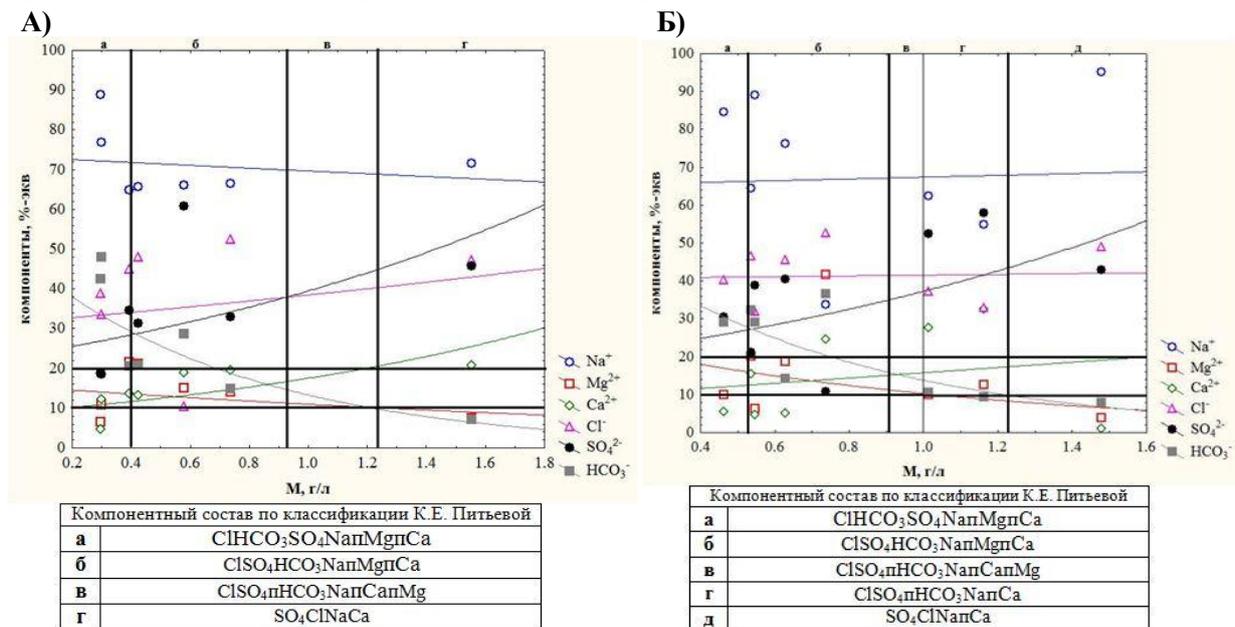


Рис. 4. Классификационные гидрогеохимические диаграммы по данным анализа подземных вод, отобранных из родников (А) и скважин с глубин >100 м (Б)

5.1. Литологический состав рыхлых пород бассейна и пород фундамента. Рыхлые отложения пролювиальные, аллювиальные, речные, озерные, эоловые, болотные, представленные гравийно-галечниковыми, гравийно-песчаными, песчаными и песчано-глинистыми разностями. Глинистые разности неоднородные и нешироко распространенные; эоловые образования преобладают в восточных и юго-восточных районах вблизи пустыни Бадын-Джаран; озерные чаще встречаются в центральных и северных районах бассейна. Рыхлые отложения характеризуются неоднородностью распределения частиц разного размера с тенденцией к их уменьшению с глубиной и в направлении от гор к центральным равнинам.

Породы фундамента – осадочные литифицированные песчаники и глины юрского и мелового возраста (в южном суббассейне встречается неогеновый фундамент), мощность резко изменяется с юго-запада на северо-восток от 1000-700 до 300-100 м.

5.2. Глубины залегания подземных вод. Диапазон глубин залегания подземных вод всей территории бассейна от 20-40 м в горах и предгорьях провинций питания, до 1-3 м на преобладающей равнинной части; глубины > 3 м (до 5-6 и 12-13 м) только в самой погруженной северо-восточной части бассейна. *Фоновыми* являются глубины залегания вод 2-3 м. Эти воды занимают преобладающую часть бассейна в его западной и центральной частях. Подземные воды с пониженными, по сравнению с фоновыми, глубинами залегания (1-2 м) приурочены к восточной части бассейна; с повышенными – к погруженной северо-восточной его части. *Основные причины различий* глубин залегания подземных вод связаны с неоднородностью рельефа и трещиноватостью пород, а также с направленностью потоков подземных вод.

5.3. Температуры подземных вод. Это один из значимых факторов формирования состава подземных вод. Диапазон изменений температуры подземных вод исследуемого района составляет 11.5-22.6 °С. *Фоновые* значения температуры подземных вод АМБ Хэйхэ установлены в 16 °С. *Подземные воды с фоновыми температурами* занимают преобладающую часть бассейна. Подземные воды с *пониженными* температурами приурочены к горным провинциям и предгорьям; к северо-западному району в связи с холодным азиатским муссоном; к глубоким водам территории бассейна, питающимися

горными водами; с повышенными температурами – к участкам бассейна с эндогенным влиянием и влиянием атмосферы в пониженных участках рельефа.

5.4. Зоны питания, транзита и разгрузки подземных вод. Основные питающие провинции подземных вод АМБ Хэйхэ – *горная*, обрамляющая его с юга, юго-запада, севера; *горно-речная* – с запада и северо-запада; *со стороны пустынь* Бадын-Джаран и Гоби – с востока, юго-востока и северо-востока. Существенное превышение питающих провинций над земной поверхностью бассейна в его внутренних границах обеспечивает поступление вод из них в пределы бассейна (рис. 5). Пути поступления вод питающих провинций в пределы гидрогеологических районов АМБ Хэйхэ представлены на рисунке 5. Он содержит в форме изолиний сведения о рельефе земной поверхности и об уровне поверхности подземных вод. Оценка уровня подземных вод условная; сделана на основании полученного автором высокого значения коэффициента корреляции (практически единица) между данными об абсолютных отметках рельефа земной поверхности и установившегося уровня подземных вод.

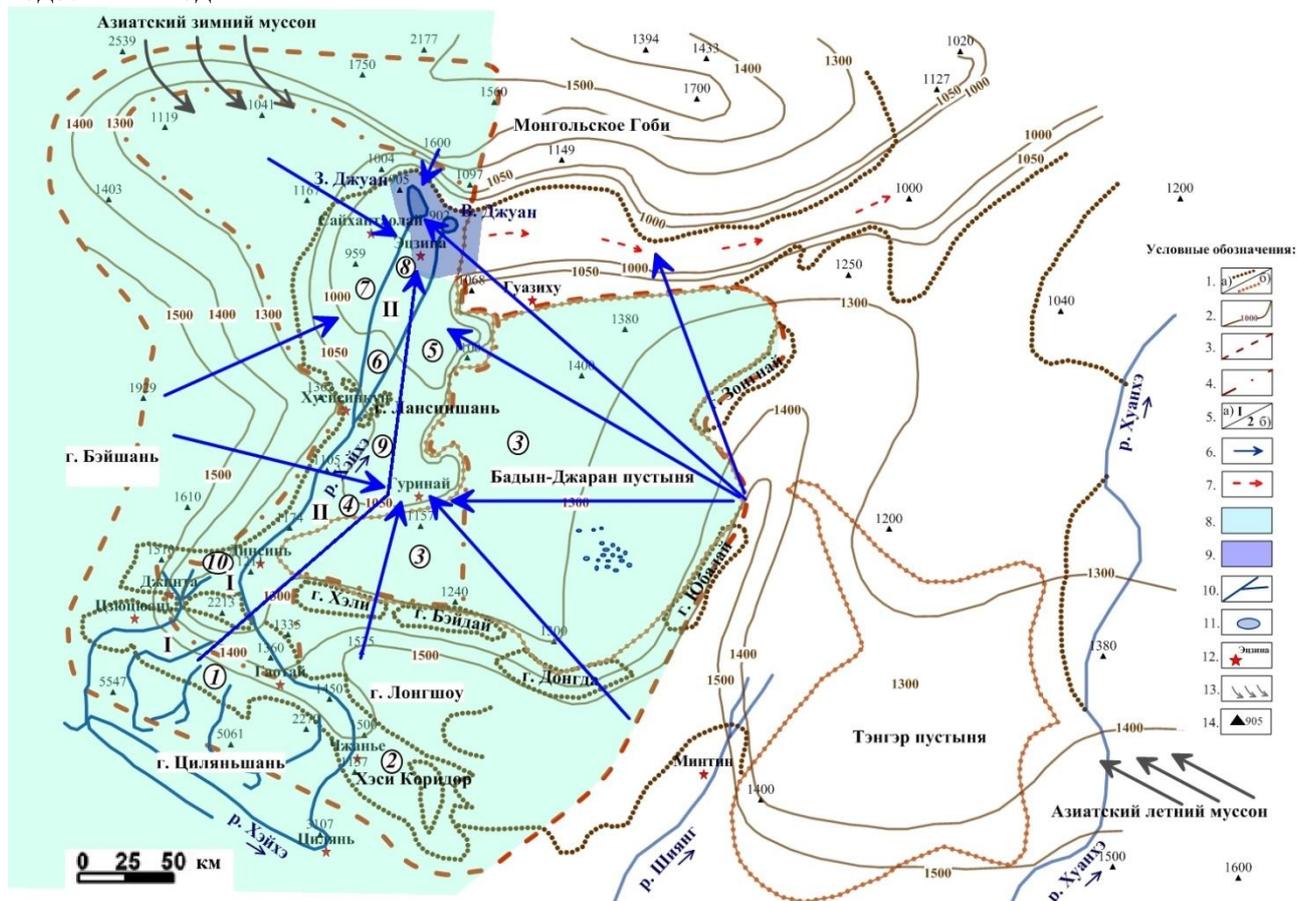


Рис. 5. Схема условий питания, потоков и разгрузки подземных вод АМБ Хэйхэ по данным космоснимка рельефа земной поверхности, использованного на основании достоверного (с коэффициентом корреляции 1) отражения рельефом характера залегания подземных вод:

I – обрамление впадины: а – горами; б – пустыней; *2* – изолиния рельефа земной поверхности и предполагаемые изолинии распределения подземных вод, абс. м; *3* – граница потока АМБ Хэйхэ; *4* – внутренняя граница АМБ Хэйхэ; *5* – гидрогеологические районы: а – южный (I); северный суббассейн (II); б – ю. предгорье (1); ю. центр (2); пустыня (3); юг (4); восток (5); запад-центр (6); северо-запад (7); впадина (8); л. воды (9); т. воды (10); *6* – направление движения потоков вод от питающих провинций; *7* – предполагаемые пути выноса вод за пределы территории бассейна; *8* – область питания и транзита подземных вод; *9* – область комплексной разгрузки подземных вод; *10* – река; *11* – озера; *12* – город; *13* – направление ветра; *14* – отметка земной поверхности, абс. м

Горное питание подземных вод бассейна подтверждают следующие положения: 1) пониженные температуры подземных вод бассейна в предгорьях; 2) направление потоков

подземных вод питающих провинций к подземным водам области транзита бассейна; уменьшение напорных градиентов и скоростей фильтрации подземных вод от питающих провинций к области транзита вод бассейна; 3) пониженные минерализация, концентрации Cl, Na и повышенные концентрации HCO_3 , SO_4 в подземных водах предгорий бассейна; 4) широкое распространение в пределах бассейна пресных подземных вод; 5) относительно пониженные величины минерализации и повышенные концентрации HCO_3 в глубоких подземных водах бассейна.

Горно-речное питание подземных вод бассейна связано со смешением горных вод Бэйшань с речной водой Хэйхэ. Воды широко используются для орошения сельскохозяйственных угодий. Расходы составляют от 8.0-13.0 до 30 м³/сек. Своеобразие состава речной воды определяется присутствием в ней и в донных осадках органических соединений и состоит в значительных содержаниях HCO_3 , Cl, Na, Ca, Mg, в повышенной до 0.7-0.8 г/л минерализации и очень низком содержании SO_4 . Это своеобразие свойственно и подземным водам-смесям западного и центрального районов бассейна.

Питание *со стороны пустыни Бадын-Джаран*. Эта провинция питает подземные воды всей восточной части АМБ Хэйхэ. Восточная граница провинции проходит по водоразделам гор Юбалай и др. с высотой ≈ 1500 абс. м. Значительная часть пресных вод, формирующихся в горах, движется к границе с АМБ Хэйхэ. Минерализация и компонентный их состав близки к подземным водам бассейна. Некоторые различия являются результатом изменчивости состава вод провинции Бадын-Джаран на пути к бассейну. Значительно влияние на воды АМБ Хэйхэ теплого азиатского муссона с юго-востока.

Поток подземных вод бассейна направлен от питающих провинций на северо-восток. На конфигурацию потоков вод оказывает влияние рельеф, смена литологического состава пород и др. Основываясь на натурных данных по напорным градиентам, рассчитанным по карте гидроизогипс, а также величинам коэффициентов фильтрации, были получены сведения о скоростях фильтрации вод районов бассейна. Напорные градиенты и скорости фильтрации уменьшаются от границ с питающими провинциями в северо-восточном направлении. Диапазон скоростей фильтрации вод в северном суббассейне сотые-десятые м/сут; в южном они несколько больше.

Преобладающие формы *разгрузки* подземных вод АМБ Хэйхэ: испарением; дренированием неровностями рельефа в виде родников, рекой, в озера. Региональное испарение обусловлено преобладанием глубин залегания подземных вод не > 3 м; локальное – наличием участков понижений в рельефе земной поверхности. Интенсивность испарения определяется величинами глубин залегания подземных вод, температурами воздуха и подземных вод. В разгрузочную впадину осуществляется региональная разгрузка вод области транзита дренированием обрывистыми склонами, высотой в несколько десятков м; испарением; предположительно выносом за пределы бассейна по коридору трещиноватых, погруженных до 1000 абс. м пород в низину рельефа Монгольского Гоби.

Глава 6. Гидрогеохимические условия АМБ Хэйхэ

Гидрогеохимические материалы для исследований включают данные о минерализации, макрокомпонентах и рН подземных и поверхностных вод АМБ Хэйхэ. Подземные воды отобраны в летне-осенний сезон с глубин до 20 м, от 20 до 100 м и ≥ 100 м из скважин (148 проб), рассредоточенных на всей изучаемой территории. Химический состав поверхностных вод (10 проб) изучался для бассейна р. Хэйхэ, озер В. и З. Джуан (5 проб).

6.1. Характеристика химического состава подземных вод. Химический состав подземных вод АМБ Хэйхэ охарактеризован посредством классифицирования по К.Е. Питьевой [Питьева, 1988]. Выбор методики классифицирования обоснован возможностью: а) получить полноценную характеристику состава вод объекта, включающую одновременно данные по минерализации и по компонентам в пределах диапазонов минерализации; б) оценить трансформацию компонентного состава вод в потоке, используя характер изменчивости компонентов при возрастании минерализации, которая, будучи

отложена по горизонтальной шкале классификационной диаграммы, отражает направленность фильтрационного потока; в) установить процессы поступления тех или иных компонентов в подземные воды исследуемого объекта и процессы вывода компонентов из вод.

Результаты оформляются в виде классификационной диаграммы, состоящей из горизонтальной оси – минерализации (г/л), вертикальной – компонентов (%-экв) и линии, проведенной параллельно оси минерализации и соответствующей 20 и 10 %-экв вертикальной шкалы (рис. 4). Далее, через точки пересечения горизонтальных линий с кривыми зависимостей распределения компонентов, проводятся вертикальные линии на общую шкалу минерализации. Таким образом, определяется компонентный состав вод в установленном диапазоне минерализации и записывается в качестве формулы состава. В формулу состава вод входят анионы и катионы в порядке от больших содержаний к меньшим (> 20 %-экв); с содержанием от 20-10 %-экв занимают последние места с буквой «п»; компоненты с содержанием < 10 %-экв в формулу состава вод не включаются.

Классифицирование подземных вод бассейна было осуществлено в три этапа. Оно позволило: 1) провести районирование изучаемой территории в соответствии с гидрогеохимическими условиями; 2) дать детальную характеристику подземным водам районов по химическому составу.

Так, воды с минерализацией < 0.5 г/л распространены на юге и востоке (кроме крайнего северо-востока) территории бассейна с компонентным составом, соответственно, $\text{ClSO}_4\text{SO}_4\text{NaMgпCa}$ и $\text{ClSO}_4\text{HCO}_3\text{NaMgCa}$ (рис. 6).

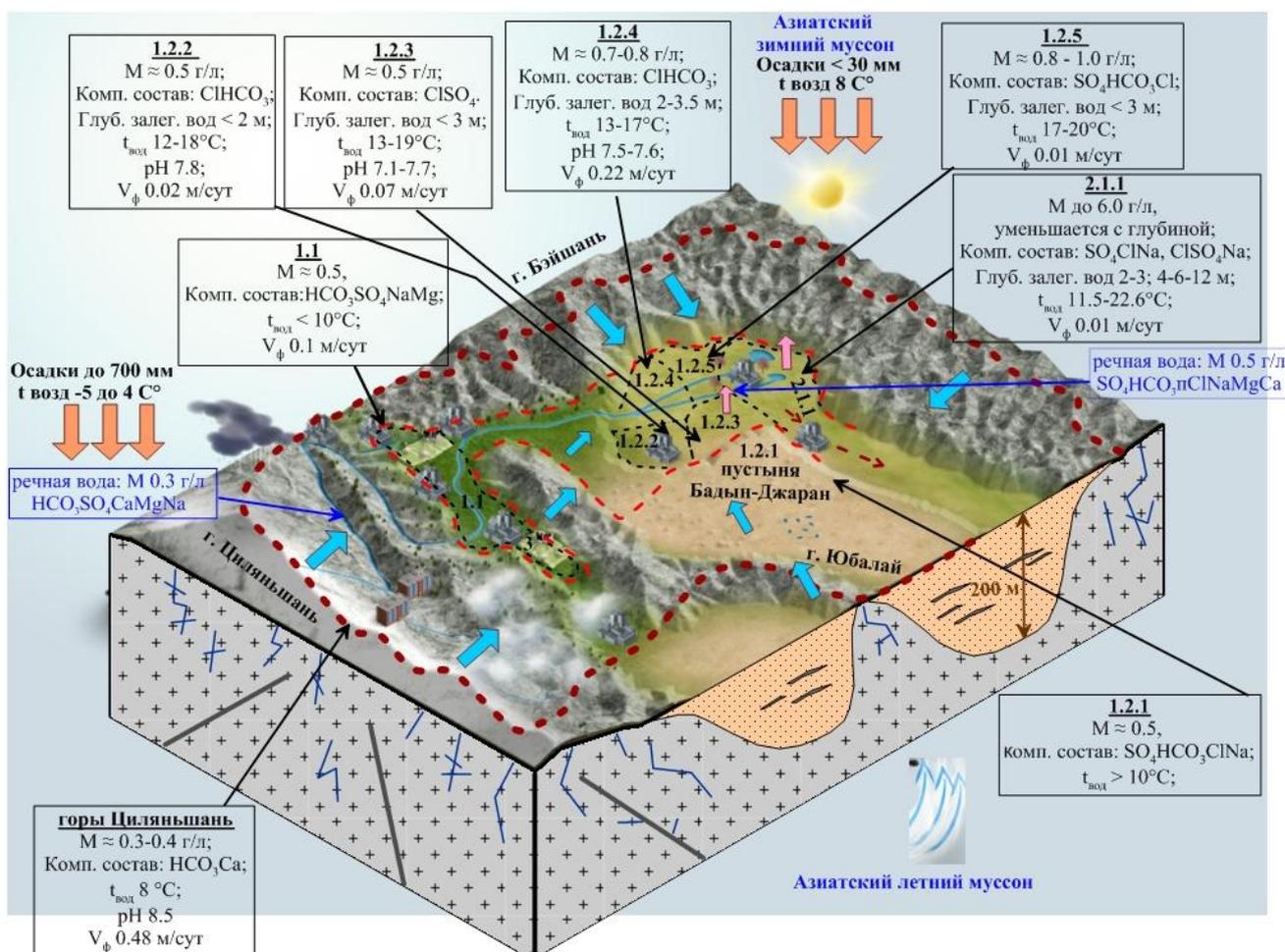


Рис 6. Схематическая модель АМБ Хэйхэ по гидрогеологическому строению и гидрогеохимическим условиям

Воды с минерализацией 0.5-1.0 г/л приурочены к западным частям территории бассейна; на участке «запад-центр» в их составе $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4$, а на северо-западе $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3$. Минерализованные воды занимают обширную внутрибассейновую депрессию на северо-востоке бассейна; в них преобладает $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3$; содержание Cl умеренное, часто $< \text{SO}_4$, но $> \text{HCO}_3$.

На территории южного суббассейна, согласно классифицированию, выделены районы: «ю.предгорье» с минерализацией < 0.5 г/л и $\text{HCO}_3\text{SO}_4\text{NaMg}(\text{MgNa})$ компонентным составом и «юг-центр» с минерализацией > 0.5 , достигающей 3.0 г/л, и преобладанием Cl, SO_4 , Na; район «пустыня», занимающий промежуточное положение между северным и южным суббассейнами, характеризуется минерализацией вод ≈ 0.5 г/л, реже 0.5-1.0 г/л с преобладанием $\text{SO}_4\text{HCO}_3\text{ClNa}$ (реже SO_4ClNa) состава.

Более полная характеристика условий формирования химического состава подземных вод районов изложена в их типизации, представленной в заключении.

Фоновый химический состав подземных вод районов определен посредством расчета средних значений минерализаций, компонентов вод. В расчет фона были включены все водопункты (скважины, родники). Установлены формулы компонентного состава вод каждого района в целом; величины pH и температуры вод представлены в минимальных, максимальных и средних (фоновых) значениях.

6.2. Гидрогеохимическое строение и зональность. АМБ Хэйхэ с генетических позиций и с точки зрения гидрогеохимических условий в разрезе представляет собой единую систему, которая в плане разделяется на районы с различным составом вод.

В целом, это геолого-гидрогеологическая система, представляющая собой мощный водоносный комплекс грунтового типа, залегающий преимущественно на юрско-меловом фундаменте, представленном плотными осадочными породами. В соответствии с геологической основой и гидрогеохимическими районами в пределах бассейна выделяются южный и северный суббассейны.

Формирование химического состава подземных вод районов начинается в пределах питающих провинций, существенно трансформируется на пути от питающих провинций и в пределах районов, где на подземные воды оказывают влияние ландшафтно-климатические и геолого-гидрогеологические факторы, существенно отличающиеся от условий питающих провинций.

Проведенный анализ гидрогеохимических условий бассейна позволил установить своеобразие зонального распределения подземных вод. Основная характеристика *зональности* следующая: 1) чередование зон направлено в соответствии с геологическим строением бассейна с юго-запада на северо-восток; 2) границы между зонами приурочены к тектоническим разрывным нарушениям; 3) каждая зона в связи с превышением гор Бэйшань над пустыней Бадын-Джаран имеет уклон с северо-запада на юго-восток; 4) все зоны в связи с различиями гидрогеологических и гидрогеохимических условий западной и восточной частей АМБ Хэйхэ имеют свои особенности в химическом составе подземных вод в плане (при постоянстве в разрезе).

Глава 7. Формирование химического состава подземных вод

7.1. Источники компонентов и факторы формирования. Компоненты подземных вод бассейна формируются за счет нижеследующих *источников*: 1) *атмосферных осадков*, образующихся в горных провинциях при таянии снежников и ледников; 2) незначительно за счет атмосферных осадков, составляющих непосредственно на равнинной территории бассейна $\approx 30-50$ мм/год при их приуроченности к летне-осеннему сезону в районах повышенного испарения; 3) *пород*, являющихся основными источниками катионогенных компонентов (Ca, Mg); источниками SO_4 при окислении сульфидных минералов кристаллических пород; источниками Na, Cl минералов континентального засоления; источником HCO_3 карбонатных минералов при их углекислотном выщелачивании; 4) *газов*: сильным окислителем из которых является атмосферный O_2 , а также преимущественно

биогенный (речной, озерный, болотный) CO_2 ; 5) *поверхностных вод*, преимущественно р. Хэйхэ на всей территории северного суббассейна; 6) *подземных вод* питающих провинций. Горная провинция Цзяньшань-Лонгшоу: минерализация вод $\approx 0.5-0.6$ г/л, pH 7.7-8, компонентный состав $\text{HCO}_3\text{SO}_4\text{MgNa}$. Горно-речная провинция Бэйшань-р. Хэйхэ: запад бассейна – минерализация вод $\approx 0.5-0.6$ г/л, pH до 9, компонентный состав $\text{ClHCO}_3\text{пSO}_4\text{NaMgCa}$; северо-запад – минерализация вод $\approx 0.5-0.6$ г/л, pH до 7.5, компонентный состав $\text{SO}_4\text{HCO}_3\text{Cl(пCl)NaMgCa}$. Провинция пустыни Бадын-Джаран (горы Юбалай и др): минерализация вод $\approx 0.5-0.6$ до 1.0 г/л (единично до 3.0 г/л), компонентный состав $\text{ClSO}_4\text{HCO}_3(\text{ClHCO}_3 \text{SO}_4)\text{NaMgpCa}$. Участие подземных вод пустыни Бадын-Джаран в питании подземных вод юго-востока и востока бассейна доказывается близким характером распределения в тех и других водах HCO_3 и Ca (рис. 7).

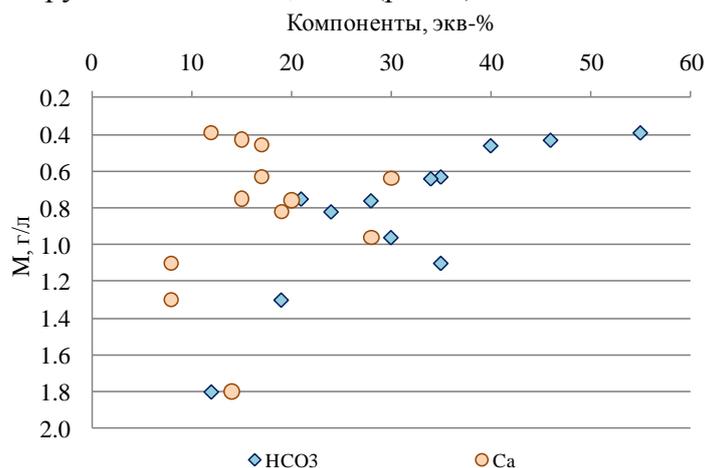


Рис. 7. Распределение HCO_3 и Ca в подземных водах питающей провинции Бадын-Джаран в условиях увеличения их минерализации

Факторы формирования состава подземных вод АМБ Хэйхэ. Проведенные детальные исследования показали, что наиболее значимыми факторами являются: *геологический* – структурный и тектонический; *гидрогеологический* – глубины залегания, температуры; *гидрогеодинамический* – направленность фильтрационных потоков от областей питания к областям разгрузки; напорные градиенты и скорости фильтрации; *гидрогеохимический* – длительность протекания процессов, наличие сульфидов в породах, обогащение речных и озерных вод органическим углеродом.

7.2. Процессы формирования химического состава подземных вод. Результаты исследований позволили установить основные *миграционные системы* и *процессы* формирования состава подземных вод бассейна: 1) подземная вода-порода-газ – процессы выщелачивания углекислотного, сернокислотного (серная кислота образуется при окислении сульфидных минералов), окисления; 2) подземная вода-порода – процессы растворения и сорбционные; 3) подземная вода – концентрирование, осаждение; 4) биогеохимическая – сульфатредукция.

Данные проведенного корреляционного анализа и гидрогеохимического классифицирования свидетельствуют:

1) По результатам корреляции минерализации и компонентов подземных вод установлены: а) слабые процессы взаимодействия вод с породами по незначительным связям минерализации с HCO_3 , Mg, Ca в водах районов юг и восток; б) значительные отрицательные связи минерализации с SO_4 , Na и SO_4 с Na; с Cl в водах районов запад-центр, свидетельствующие о процессах сульфатредукции и засолении; в) значительные положительные связи минерализации с SO_4 , Na в водах северо-запада, свидетельствующие об их сульфатном засолении; г) высокие положительные связи минерализации со всеми компонентами, кроме HCO_3 , в водах района впадина, что является свидетельством процессов испарения и концентрирования вод.

2) Результатами парной корреляции минерализации и компонентов вод района юг с водами районов запад-центр и впадина показаны значительные положительные связи по практически всем компонентам, указывающие на возрастание взаимодействия вод с породами в направлении их движения от областей питания к разгрузочной впадине.

3) Основные результаты изучения особенностей формирования химического состава подземных вод в условиях горно-речного питания показали возникновение и усиление процессов изменения окислительных условий на восстановительные в направлении движения вод к области разгрузочной впадины, условий засоления, процессов углекислотного выщелачивания, обмена Ca, Mg вод на Na пород, процессов сульфатредукции.

4) Основные результаты изучения особенностей формирования химического состава подземных вод, установленные при гидрогеохимическом классифицировании, свидетельствуют о широком развитии в водах районов области транзита процессов углекислотного выщелачивания, выраженных возрастанием концентраций HCO_3 , Ca, Mg с увеличением минерализации; процессов хлоридного засоления (по возрастанию Cl, Na с возрастанием минерализации); сульфатного засоления, установленного по возрастанию SO_4 , Na; и сульфатредукции – по уменьшению концентраций SO_4 , Na в водах при возрастании минерализации и т.д.

7.3. Геохимические типы подземных вод. Большой вклад в изучение гидрогеохимических условий аридных территорий внесли В.С. Самарина, К.Е. Питьева, В.А. Ковда, Н.И. Базилевич, С.Л. Шварцев, Л.В. Славянова, М.С. Галицын и др. Изучение геохимических особенностей подземных вод артезианских межгорных бассейнов типа Хэйхэ пока слабое. Значительный интерес представляют работы, в которых рассмотрены гидрогеохимические условия территории АМБ Хэйхэ [Chen et al., 2006; Zhu et al., 2009; Yang et al., 2011; Qin et al., 2012; Wang et al., 2013].

Настоящими исследованиями установлено, что подземные воды АМБ Хэйхэ принадлежат к гидрокарбонатному, сульфатному и хлоридному типам, однозначным по катионам, представленным преимущественно Na, очень редко Mg, Ca типами. Для южного суббассейна характерны гидрокарбонатный и сульфатный типы, для северного – сульфатный и хлоридный.

Гидрокарбонатные подземные воды вследствие присутствия Na_2CO_3 , относятся к содовым. В пределах АМБ Хэйхэ содовые воды распространены в предгорьях *южного суббассейна*, где они формируются за счет горного питания (Циляншань); а также в пределах *северного суббассейна*, на его юго-восточной и восточной перифериях (районы *юг, восток*), формирующиеся за счет горного питания (Циляншань, Лонгшоу) и со стороны пустыни Бадын-Джаран и гор Юбалай. Преимущественная минерализация содовых вод ≈ 0.5 г/л, компонентный состав в южном суббассейне $\text{HCO}_3\text{SO}_4(\text{Cl})$, в северном – $\text{ClHCO}_3\text{SO}_4$ и $\text{HCO}_3\text{SO}_4\text{Cl}$.

Сульфатные подземные воды распространены на территории бассейна рассредоточено и характеризуются разнообразием формирования. В *северном суббассейне* они приурочены к северо-западу и к северо-востоку. На *северо-западе* имеют минерализацию, близкую к 1.0 г/л, $\text{SO}_4\text{HCO}_3\text{Cl}(\text{ClHCO}_3)\text{NaMgCa}$ состав. В их формировании значительную роль играет длительное окисление сульфидов пород пологих склонов Бэйшань. На *северо-востоке* минерализация сульфатных вод приближается к 6.0 г/л, состав $\text{SO}_4\text{ClNaMgCa}$. Главный процесс формирования вод – концентрирование, обусловленное интенсивным испарением в условиях застойного режима вод. Сульфатные воды преобладают на территории района *пустыни*, где имеют минерализацию < 1.0 г/л, $\text{SO}_4\text{HCO}_3\text{ClNa}$ состав; формируются за счет горного питания. Также воды сульфатного типа распространены в районе «*ю.центр*» *южного суббассейна*, будучи приурочены к техногенным условиям городов и сельскохозяйственных угодий. Их минерализация варьирует в диапазоне от 1.0 до ≈ 3.0 г/л. В составе вод наряду с SO_4 часто повышены концентрации Cl, присутствует HCO_3 .

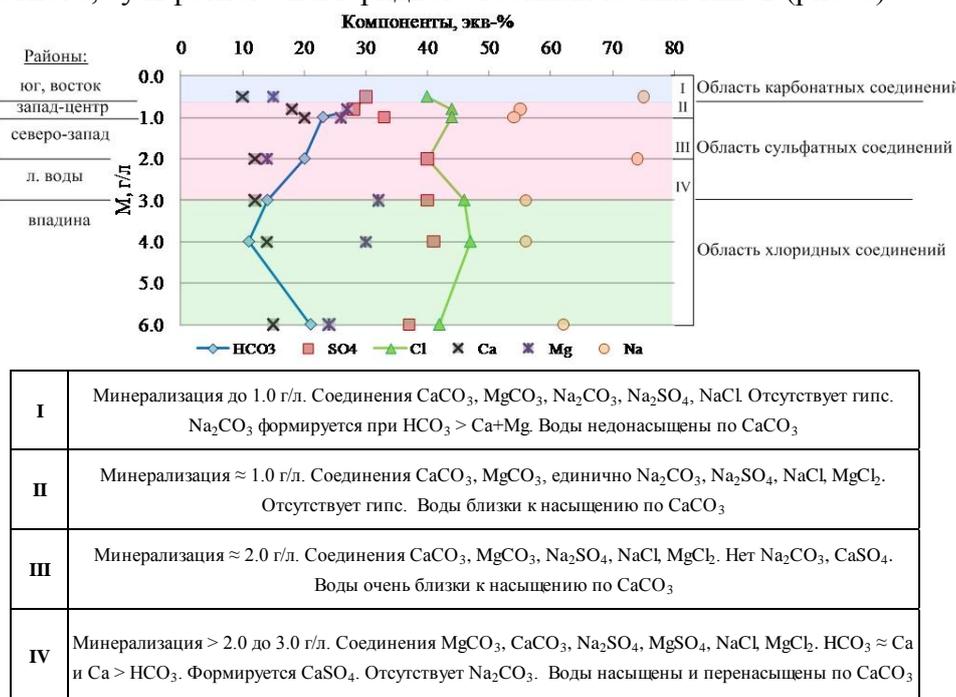
Хлоридные подземные воды. Особенность распространения вод хлоридного типа заключается в: а) в водах южного суббассейна встречаются редко, вследствие пониженных температур и увеличенных глубин залегания вод (< 3-5 м); б) приуроченности подземных вод класса CaHCO_3 к западной части северного суббассейна, а класса CaSO_4 – к восточной части бассейна; в первом случае в связи с речным влиянием, во втором – в связи с окислением сульфидов пород. Источники Cl и Na в водах – вторично засоленные породы. Их засоление осуществляется через испарение.

В целом, территория АМБ Хэйхэ с позиций распространения вод хлоридного типа делится на три части. 1) Южный суббассейн с практическим отсутствием вод хлоридного типа естественного формирования; их формирование связано с техногенными условиями городов и сельскохозяйственных угодий. Минерализация вод от 1.0 до 3.0 г/л, в составе наряду с Cl присутствует SO_4 , в меньшей степени HCO_3 .

2) Восточная часть северного суббассейна, граничащая с пустыней Бадын-Джаран, характеризуется интенсивным испарением подземных вод, в связи с небольшими глубинами их залегания и высокими температурами воздуха независимо от минерализации. На севере восточной части бассейна минерализация вод > 1.0 г/л до 6.0 г/л (район *впадина*). Причина формирования Cl – испарение в условиях застойного режима. Подземные воды районов *юг*, *восток* характеризуются минерализацией ≈ 0.5 г/л. Причина – относительно пониженная температура воздуха, малые длины путей фильтрации от питающей провинции со стороны пустыни Бадын-Джаран, влияние горных кряжей (Юбалай), юго-восточный теплый влажный муссон.

3) Подземные воды *района запад-центр* (с долиной р. Хэйхэ). В них повышена минерализация (0.7-0.8 г/л), $\text{pH} < 9$, повышены концентрации HCO_3 , Ca , Mg вследствие интенсивного углекислотного выщелачивания; понижены Na и SO_4 вследствие сульфатредукции, обеспечиваемой восстановительными условиями долины р. Хэйхэ и ее окружения. Питание подземных вод горное со стороны г. Циляншань, Лонгшоу; горно-речное – со стороны г. Бэйшань, р. Хэйхэ; со стороны пустыни Бадын-Джаран и гор Юбалай.

В целом, для территории АМБ Хэйхэ установлены условия формирования компонентного состава подземных вод с различной минерализацией, приуроченных к гидрогеологическим районам, с разным содержанием компонентов в водах гидрокарбонатного, сульфатного и хлоридного геохимических типов (рис. 8).



На рисунке 8 отражено распределение компонентов в водах районов, построенное относительно возрастания минерализации. Табличные данные включают для районов перечень соединений компонентов, главные процессы их формирования, условия насыщения слабо растворимыми образованиями (CaCO_3 , MgCO_3 , CaSO_4).

Глава 8. Проблемы и перспективы использования подземных вод АМБ Хэйхэ

8.1. Засоление подземных вод по региональным данным и моделированию.

Обоснованием рассмотрения вопроса о засолении подземных вод АМБ Хэйхэ является пристальное внимание гидрогеологов к отрицательному влиянию засоления на многие сельскохозяйственные виды работ. В мелиоративной гидрогеологии указывается [Ковда, 1977; Кац, 1988]: а) наличие солей в почвенном растворе оказывает огромное влияние на жизнедеятельность растений, сельскохозяйственных посевов, на водный режим почв, на физико-химические и гидрофизические их свойства. Вредными для растений являются соли NaCl , Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , MgCl_2 , MgSO_4 , CaCl_2 ; б) наиболее распространена и токсична NaCl (вследствие ее токсичной активности и высокой растворимости); в) смеси солей более безвредны, чем преобладание одной соли.

Главный показатель засоления подземных вод – повышенные концентрации высоко растворимых солей. Главное условие засоления – испарение подземных вод. *Подземные воды АМБ Хэйхэ характеризуются региональным засолением*, на что указывает широкая их принадлежность к хлоридному типу и глубинам залегания преимущественно < 3 м. Состав подземных вод бассейна в *солевой форме* (гипотетические соли) представлен постоянно присутствующими независимо от минерализации CaCO_3 , MgCO_3 , Na_2SO_4 , NaCl ; непостоянно присутствующими Na_2CO_3 , CaSO_4 , MgSO_4 , MgCl_2 ; отсутствует CaCl_2 .

На территории АМБ Хэйхэ гидрогеологические районы характеризуются различным набором соединений, показателем которых является минерализация подземных вод: районы юг, восток – минерализация < 0.5 г/л, CaCO_3 , MgCO_3 , Na_2CO_3 , Na_2SO_4 , NaCl , MgCl_2 ; районы запад-центр, северо-запад с минерализацией 0.5-1.0 г/л, CaCO_3 , MgCO_3 , Na_2SO_4 , NaCl , MgCl_2 ; район впадина с минерализацией до ≈ 6.0 г/л, CaCO_3 , CaSO_4 , Na_2SO_4 , NaCl , MgCl_2 .

По данным Qiu Yang и др. [2011] *индекс насыщения (SI)* кальцита (CaCO_3) в подземных водах разных частей бассейна колеблется от -0.18 до 0.44; гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) от -2.34 до -1.15; галита (NaCl) от -8.32 до -5.81.

Оценка интенсивности засоления подземных вод осуществлена посредством вычисления суммарных содержаний анионогенных и катионогенных компонентов, участвующих в образовании солей, суммарных содержаний высоко растворимых и слабо растворимых солей, отношений первых ко вторым. Величины превышений высоко растворимых над слабо растворимыми солями разграничены условно на пять групп, которым были присвоены наименования в форме (арабских цифр) градаций засоления по интенсивности. Эти величины легли в основу карты распространения засоления подземных вод АМБ Хэйхэ (рис. 9).

Анализ полученных результатов позволил сделать *выводы*: а) значительное засоление подземных вод характерно для северного суббассейна; слабое для вод южного суббассейна, имеющее, главным образом, техногенный генезис; б) на территории северного суббассейна установлены районы по интенсивности засоления и названы их причины; в) глубокие подземные воды засолены несколько меньше неглубоких, вследствие более низких их температур, не способствующих накоплению высоко растворимых солей.

Опасность засоления подземных вод бассейна для сельскохозяйственной деятельности с позиций широкого распространения оросительных систем повышена для южного суббассейна и северной, центральной частей северного суббассейна; с позиций токсичности к сельскохозяйственным посевам, опасность существует вследствие распространения смешанного засоления при незначительной минерализации – гидрокарбонатно-сульфатного в южном суббассейне; сульфатно-хлоридного на востоке северного суббассейна; гидрокарбонатно-хлоридного в южной, центральной и западной

частях северного суббассейна; с высокой минерализацией (> 1.0 г/л) – сульфатно-хлоридного в северной части северного суббассейна.

Моделирование испарения, как главного условия засоления подземных вод, выполнено в программе *Hydrus 1-D*, которое основано на уравнениях переноса веществ, учитывает свойства почвы, начальные и граничные условия.

Цель моделирования – оценка влияния процессов континентального засоления на химический состав подземных вод.

Методика основана на моделировании трансформации влаги на поверхности земли и влагосолепереноса в зоне аэрации.

Для обеспечения математической модели использовалась информация о гранулометрическом составе пород зоны аэрации; климатические данные по метеостанции района Эцзина (температуры воздуха, атмосферные осадки), глубины залегания и минерализация подземных вод.

Для расчетов были рассмотрены два типа ландшафта (пустынный без растительности и оазис с растительностью) и *три участка* территории северного суббассейна. Участки различны по типу строения зоны аэрации, фильтрационным свойствам пород, мощности зоны аэрации, относятся к различным гидрогеологическим районам.

Результаты моделирования представлены зависимостями среднесезонного испарения подземных вод от глубины их залегания и графиками концентрации веществ в зависимости от глубины на конечный момент моделирования (рис. 10).

Диапазон величин испарения на конечный момент моделирования на исследованных участках для случая пустынного ландшафта без растительности составляет $\approx 100-400$ мм/год (рис. 10а); концентрации веществ от ≈ 35 до 100 г/л (рис. 10б). Как видно из рисунка 10, на

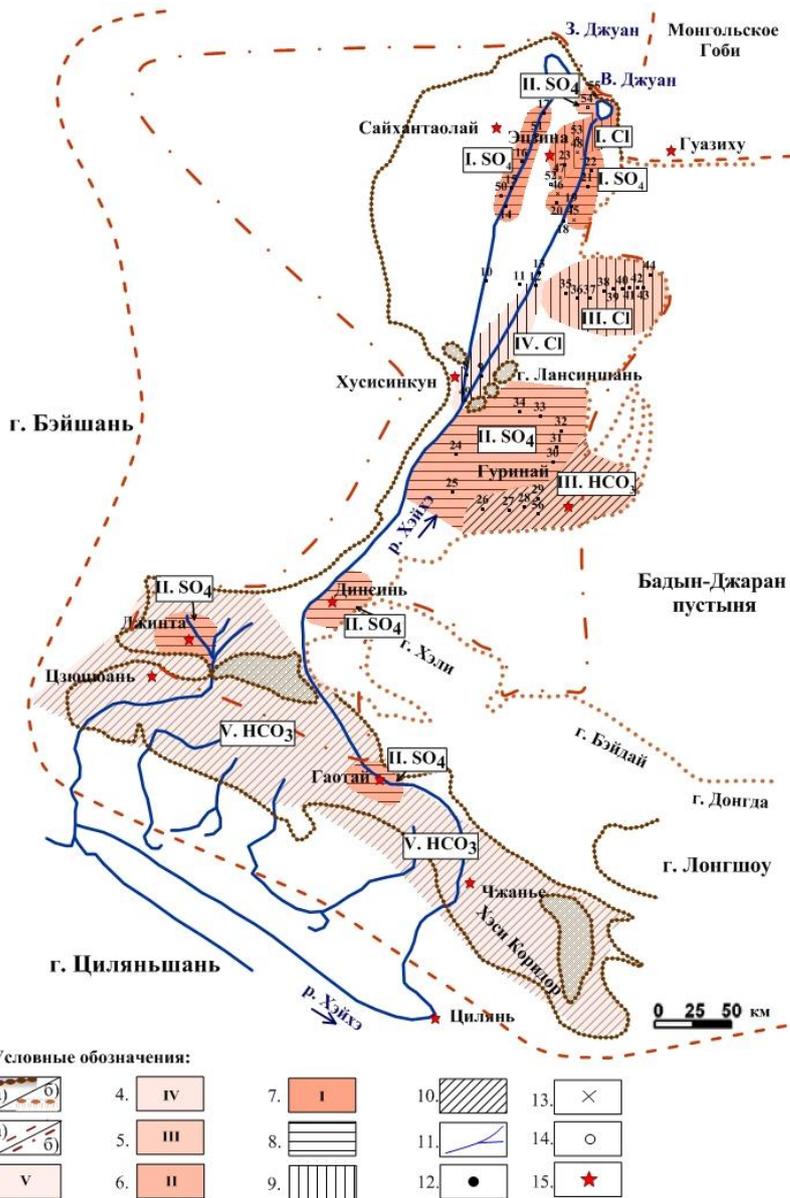


Рис. 9. Схематическая карта распространения засоленных подземных вод на территории АМБ Хэйхэ:
1 – обрамление впадины: а – горами, б – пустыней; **2** – граница потока АМБ Хэйхэ: а – внешняя; б – внутренняя;
3–7 – распространение засоленных подземных вод согласно градациям засоления: **3** – очень слабое, <1 (V); **4** – очень слабое, 1-3 (IV); **5** – слабое, 3-5 (III); **6** – умеренное, 5-10 (II); **7** – существенное, >10 (I); **8–10** – геохимический тип подземных вод: **8** – SO_4 ; **9** – Cl; **10** – HCO_3 ; **11** – р. Хэйхэ; **12–14** – номер наблюдательной скважины с глубиной <20 ; 20-100; >100 м; **15** – города

участках 1 и 2 при глубине залегания уровня подземных вод ≤ 1.5 м происходит накопление солей, связанное с испарением. На 3-м участке данный процесс наблюдается до глубин порядка 3 м, а на глубинах более 3 м испарение отсутствует.

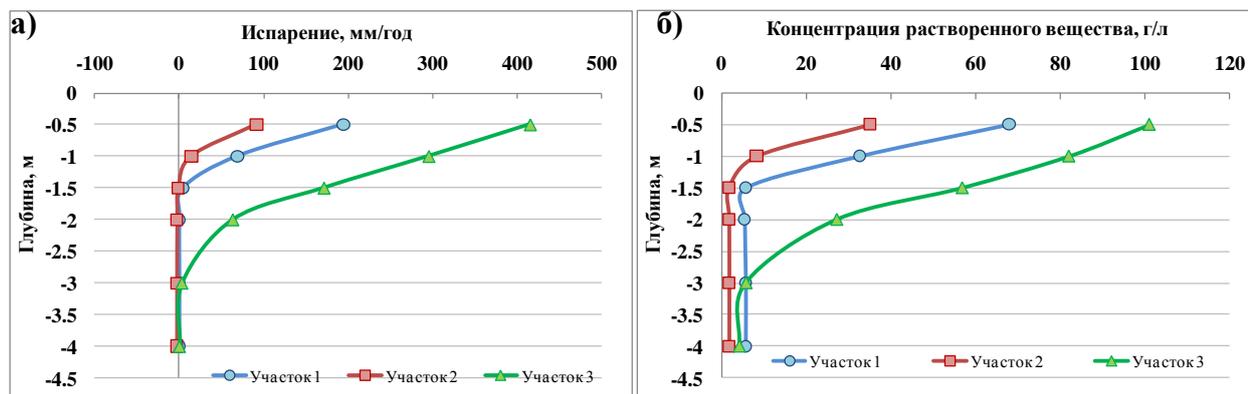


Рис. 10. Результаты моделирования исследуемых участков (без учета растительности):
 а) зависимость среднемноголетнего испарения от глубины залегания уровня подземных вод;
 б) зависимость концентрации растворенного вещества от глубины залегания уровня подземных вод

В целом, результаты подтверждают обширное для исследованной территории испарение и фиксируют увеличение концентрации веществ в зоне аэрации, установленное также и натурными исследованиями. Интенсивность испарения в пределах исследуемых участков различная. В пределах отдельно взятых участков существует прямая связь между испарением и концентрацией веществ, характеризуется возрастанием по мере повышения интенсивности испарения. Таким образом, представленные результаты отражают, что для условий пустынного ландшафта, интенсивность процесса засоления зависит от мощности зоны аэрации.

Также было установлено, что интенсивность испарения и засоления вод различная в зависимости от типа ландшафта. В ландшафтных условиях, связанных с оазисом, транспирация влаги корнями растений играет важную роль в процессах континентального засоления и не влияет на ухудшение качества подземных вод. Обратная ситуация наблюдается в пустынных ландшафтах без участия растительности, где химический состав подземных вод изменяется за счет их концентрирования при небольшой мощности зоны аэрации.

Различие в интенсивности испарения объясняется влиянием одновременно комплекса факторов с разной силой влияния. Установленные по результатам моделирования факторы, влияющие на интенсивность процесса испарения в изучаемом районе, представлены глубинами залегания вод, геофильтрационным фактором, температурой воздуха, атмосферными осадками.

8.2. Качество подземных вод. Результаты изучения качества подземных вод АМБ Хэйхэ показали преобладание пресных подземных вод над минерализованными.

Воды, непригодные для водоснабжения вследствие превышения их минерализации над 1.0 г/л, приурочены: а) к участкам интенсивного испарения в условиях неглубокого залегания (до 3 м), рассредоточенные по территории бассейна. Минерализация таких вод составляет $\approx 1.0-4.0$ г/л; б) к северо-восточной части бассейна в пределах внутрибассейновой разгрузочной впадины; минерализация вод достигает почти 6.0 г/л. Распространены до глубин $\approx 80-100$ м. Подземные воды с превышением ПДК по SO_4 и Cl приурочены к типу минерализованных вод, распространены в пределах внутрибассейновой разгрузочной впадины и в пределах минерализованных линз локального испарения в пределах районов «запад-центр» и «восток». Таким водам соответствуют жесткие воды. Над ПДК жесткость вод не превышает единиц, реже первых десятков мг-экв/л.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают, что территория АМБ Хэйхэ характеризуется рядом общих факторов. В первую очередь это **физико-географические** факторы: незначительное (30-50 мм/год) количество атмосферных осадков в равнинной части бассейна; высокие температуры воздуха (25-30 °С) и устойчивые средние температуры подземных вод (16 °С); вследствие ветровой деятельности образование понижений в рельефе. Во-вторую – **геологические**: общая структурно-тектоническая направленность АМБ Хэйхэ; практически полное окружение впадины горами и пустынями. В-третью – **гидрогеологические**: незначительные глубины залегания подземных вод (< 3 м), питание горное, горно-речное, со стороны пустынь; однонаправленность потоков подземных вод; региональное распространение испарения, засоления; смешение более тяжелых подземных вод верхней части АМБ Хэйхэ с менее тяжелыми глубокими водами.

При типизации АМБ Хэйхэ в гидрогеологический тип объединены подземные воды, характеризующиеся общностью источников, факторов и процессов формирования гидрогеологического строения и гидрогеохимических условий данного бассейна. В пределах типов выделены разного уровня подтипы, обуславливаемые ограниченным числом показателей своеобразия гидрогеологического строения и гидрогеохимических условий подтипа (рис. 6). Показателем абсолютного большинства характеристических положений гидрогеологического строения и гидрогеохимических условий АМБ Хэйхэ является минерализация подземных вод, которая является основой наименования типов вод. Типизация, отражающая однообразие в разрезе и плановую разобщенность бассейна, позволила выделить следующие типы подземных вод:

1. Тип 1 пресных подземных вод области транзита. *Питание:* подземных вод горное, горно-речное, со стороны пустынь Бадын-Джаран, Монгольское Гоби. *Разгрузка:* испарением. Умеренным в центральной части территории северного суббассейна, интенсивным на северо-востоке бассейна. Дренированием крутыми склонами разгрузочной впадины на северо-востоке бассейна.

Подтип 1.1 подземных вод района «*предгорье*» южного суббассейна, с абсолютными отметками 2000-1300 м, температурой < 10 °С; минерализацией < 0.5 г/л $\text{HCO}_3\text{SO}_4\text{NaMg}(\text{MgNa})$ состава, формирующегося при таянии ледников, снежников и окисления сульфидов пород.

Подтип 1.2 подземных вод северного суббассейна района «*пустыня*» (*подтип 1.2.1*) с абсолютными отметками $\approx 1240-1160$ м, температурой > 10 °С, питающихся горными водами Лонгшоу и со стороны юго-востока пустыни Бадын-Джаран; минерализация ≈ 0.5 г/л, главные компоненты SO_4 , HCO_3 , Cl , Na .

Подтип 1.2.2 подземных вод района «*юг*» с абсолютными отметками $\approx 1040-1030$ м, температурой 12.5-17.5 °С, $\text{pH} \approx 7.8$, глубины залегания < 2 м; минерализация < 0.5 г/л $\text{ClHCO}_3\text{SO}_4(\text{HCO}_3\text{ClSO}_4)\text{NaMgпCa}$ состава, питающихся горными водами Циляншань и водами со стороны пустыни Бадын-Джаран. Взаимодействие с породами слабое, представленное окислением сульфидов, углекислотным выщелачиванием, засолением, что подтверждается высокими корреляционными связями всех компонентов с минерализацией. Подземные воды, отобранные с глубины 144 м, имеют состав, сходный с составом неглубоких вод. В составе вод присутствует Na_2CO_3 .

Подтип 1.2.3 подземных вод района «*восток*» с абсолютными отметками $\approx 935-917$ м, температурой 12.7-19 °С, $\text{pH} \approx 7.1-7.7$, глубины залегания < 3 м; минерализация ≈ 0.5 г/л, $\text{ClSO}_4\text{HCO}_3(\text{пHCO}_3)\text{Na}$ составом. Присутствует Na_2CO_3 . Питание подземных вод горное (со стороны Циляншань) и со стороны пустыни Бадын-Джаран со слабым углекислотным выщелачиванием пород, несколько усиленным окислением сульфидов пород и процессом засоления. Наблюдаются высокие коэффициенты корреляции минерализации с компонентами.

Подтип 1.2.4 подземных вод района «*запад-центр*» с абсолютными отметками 1000-1050 м, температурой 13.5-16.5 °С, глубинами залегания 2.5-3.5 м; минерализацией 0.7-

0.8 г/л, $\text{ClHCO}_3\text{пSO}_4\text{NaMgпCa}$ составом. Минерализация вод в потоке увеличивается за счет Cl , HCO_3 , Na , Mg , Ca . Основные процессы: сульфатредукция (доказано классифицированием и корреляцией); результат – низкие концентрации Na , SO_4 . Высокие минерализация, концентрации HCO_3 , Ca , Mg – окисление Сорг, углекислотное выщелачивание Ca , Mg , сульфатредукция. Отсутствует Na_2CO_3 . Присутствует засоление NaCl .

Подтип 1.2.5 подземных вод района «северо-запад» с абсолютными отметками 991-922 м, температурой 16.8-19.6 °С, глубинами залегания < 3 м; минерализация 0.8-1.0 г/л, $\text{SO}_4\text{HCO}_3\text{ClNaMgпCa}$ составом. Особенности формирования состава вод данного района – приближение минерализации к 1.0 г/л; высокая концентрация SO_4 ; низкая – Cl . Высокие минерализация и концентрация SO_4 объясняются длительностью взаимодействия вод горного питания с кристаллическими и рыхлыми породами пологого северо-восточного склона Бэйшань по принципу окисления сульфидных минералов. Относительно незначительные концентрации Cl – результат влияния холодных зимних муссонов, снижающих интенсивность концентрирования хлоридов натрия в водах.

2. Тип 2 минерализованных подземных вод областей разгрузки. Воды поступают из области транзита и питающих провинций. **Подтип 2.1** подземные воды северного суббассейна.

Подтип 2.1.1 подземные воды района «впадина», с абсолютными отметками 900-1027 м, температурой 11.5-22.6 °С (с глубиной), глубинами залегания, увеличивающимися к центральной части впадины от < 3 до 12 м; минерализация 2.0-5.8 г/л, преобладающий компонентный состав $\text{SO}_4\text{Cl}(\text{ClSO}_4)\text{NaMgпCa}$. В пределах района наиболее минерализованными и тяжелыми являются воды, формирующиеся на меньших (до 3 м) глубинах в условиях интенсивного испарения и застойного режима. Развивается механизм погружения этих вод и смешение с менее минерализованными. На глубинах > 100 м наблюдается наличие пресных вод.

Подтип 2.1.2 подземных вод района «л. воды» (линзообразные), формирующихся на локальных участках понижений глубин их залегания до ≈ 1 м в рельефе земной поверхности. Создаются условия интенсивного испарения с минерализацией вод до 2.0-4.0 г/л. Главный процесс формирования минерализации и компонентного состава вод – концентрирование.

3. Тип 3 подземных вод техногенных условий. Подтип 3.1.1 района «ю. центр». Минерализация подземных вод ≈ 1.0 г/л, достигая ≈ 3.0 г/л. Среди компонентов преобладают Cl , SO_4 . Питание поступает со стороны гор Циляншань, Бэйшань. Река Хэйхэ не участвует в питании вод данного подтипа. Повышенная минерализация обусловлена влиянием техногенных вод крупных городов, окружающих территорию данного подтипа, а также влиянием ирригационных сооружений и с/х производств.

Подтип 3.1.2 района «т. воды». Подземные воды территориально разобщены по всему бассейну. В рассматриваемый вид района входят воды территорий каналов, сельскохозяйственных площадей, добычи и разработки материалов промышленности, городского загрязнения.

В итоге проведенных исследований установлено, что АМБ Хэйхэ представляет собой геолого-гидрогеологическое сооружение, возникшее на основе глобальных тектонических разнонаправленных процессов (воздымании гор и опускании межгорий) и развившееся в течение длительного времени под влиянием ландшафтно-климатических, гидрологических факторов и др., получившее современное гидрогеологическое строение и гидрогеохимические условия. АМБ Хэйхэ характеризуется существенной водоносностью подземного стока питающих провинций; преобладанием пресных подземных вод в пределах бассейна; относительно слабым распространением подземных вод с превышением над ПДК по минерализации, рН, жесткости, содержанию SO_4 и Cl ; распространением засоления подземных вод различной интенсивности в разных частях бассейна.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных п.2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском Государственном Университете имени М.В. Ломоносова

1. Питьева, К.Е., Барановская, Е.И. Гидрогеохимические условия грунтового водоносного комплекса артезианского бассейна Хэйхэ [Текст] / К.Е. Питьева, Е.И. Барановская, Ван Пин, Цзинцзе Юй // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. – 2015. – №2. – С. 106–115.

2. Барановская, Е.И. Гидрогеологическая структура межгорного артезианского бассейна Хэйхэ (Китай) [Текст] / Е.И. Барановская, К.Е. Питьева // Геоэкология. Инженерная геология. Геоэкология. – 2016. – №6. – С. 497–509.

3. Baranovskaya, E.I. Schematic zoning of the region of the Caspian artesian basin with respect to the formation of the chemical composition of underground waters in the upper hydrogeodynamic zone [Текст] / E.I. Baranovskaya // Moscow University Geology Bulletin. – 2014. – Vol. 69, №2. – P. 85–90.

4. Baranovskaya, E.I. On the borders of the upper hydrogeodynamic zone in the Caspian artesian basin [Текст] / E.I. Baranovskaya, K.E. Pitjeva // Moscow University Geology Bulletin. – 2016. – Vol. 71, №4. – P. 304–310.

Статьи и тезисы докладов в сборниках трудов конференций

5. Барановская, Е.И. Оценка состава и качества подземных вод верхней гидродинамической зоны в условиях эксплуатации нефтегазоконденсатных месторождений [Электронный ресурс] / Е.И. Барановская // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. Режим доступа: <http://oilgasjournal.center.ru/archive/issue/details/0/2134> (12.08.2016), 2012. – №1(5).

6. Барановская, Е.И. Проблемы формирования химического состава и качества природных вод территории с аридным климатом на примере Прикаспийского артезианского бассейна и артезианского бассейна Хэйхэ [Текст] / Е.И. Барановская // материалы VII международной научной конференции молодых ученых и талантливых студентов «Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность» (Москва, 11-13 декабря 2013 г.). – М.: ИВП РАН, 2013. – С. 148-152.

7. Барановская, Е.И. Кратко о признаках эколого-гидрогеохимического районирования верхней гидродинамической зоны Прикаспийского артезианского бассейна [Текст] / Е.И. Барановская // материалы международной научной конференции «Гидрогеология сегодня и завтра: наука, образование, практика» (Москва, 22-24 мая 2013 г.). – М.: МАКС Пресс, 2013. – С. 147-150.

8. Барановская, Е.И. Формирование гидрогеоэкологической обстановки при эксплуатации газоконденсатных месторождений в районах с аридным климатом [Текст] / Е.И. Барановская // материалы III Всероссийской научной конференции с международным участием (к 90-летию А.А. Карцева) «Фундаментальные и прикладные вопросы гидрогеологии нефтегазоносных бассейнов». – М.: ГЕОС, 2015. – С. 217-220.