
**ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ
И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

УДК 556.38

**ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА МЕЖГОРНОГО
АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА ХЭЙХЭ (КИТАЙ)¹**

© 2016 г. Е. И. Барановская, К. Е. Питьева

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Ленинские Горы, 1, Москва, 119991 Россия.*

E-mail: baranovskaya_kat@mail.ru, kepitjeva@mail.ru

Поступила в редакцию 08.09.2015 г.

После исправления 27.01.2016 г.

Изложены основные результаты исследований гидрогеологического строения артезианского бассейна Хэйхэ, расположенного в северо-западной части Китая, представляющей собой обширную гористо-равнинную территорию, характеризующуюся аридным климатом и значительным дефицитом вод хозяйственно-питьевого значения. Эта территория обрамлена с юга, запада и севера горами разной высотности и в целом имеет пониженные относительно обрамляющих гор отметки земной поверхности и широтное простирание.

Ключевые слова: *подземные воды, источники формирования подземных вод, аридные территории, гидрогеологическая структура, артезианский бассейн Хэйхэ, бассейн межгорного типа.*

ВВЕДЕНИЕ

К относительно равнинным участкам рассматриваемой территории приурочены межгорные впадины, заполненные континентальными образованиями, представленными в основном продуктами разрушения гор, речными и озерными отложениями.

Впадины вытянуты с юга в северном, с тенденцией на северо-восток, направлении от отметок, характерных для высокогорий и среднегорий (от ≈ 5000 и более до ≈ 3000 абс. м, приближающихся в северных районах к $1000\text{--}950$ абс. м). В пределах впадин с юга на север протекают крупные реки.

Одна из таких впадин – впадина Хэйхэ с наиболее высоким горным обрамлением, массивом Циляншань, имеющим отметки, превышающие 5500 м и приуроченные к юго-западной части указанной выше территории (рис. 1).

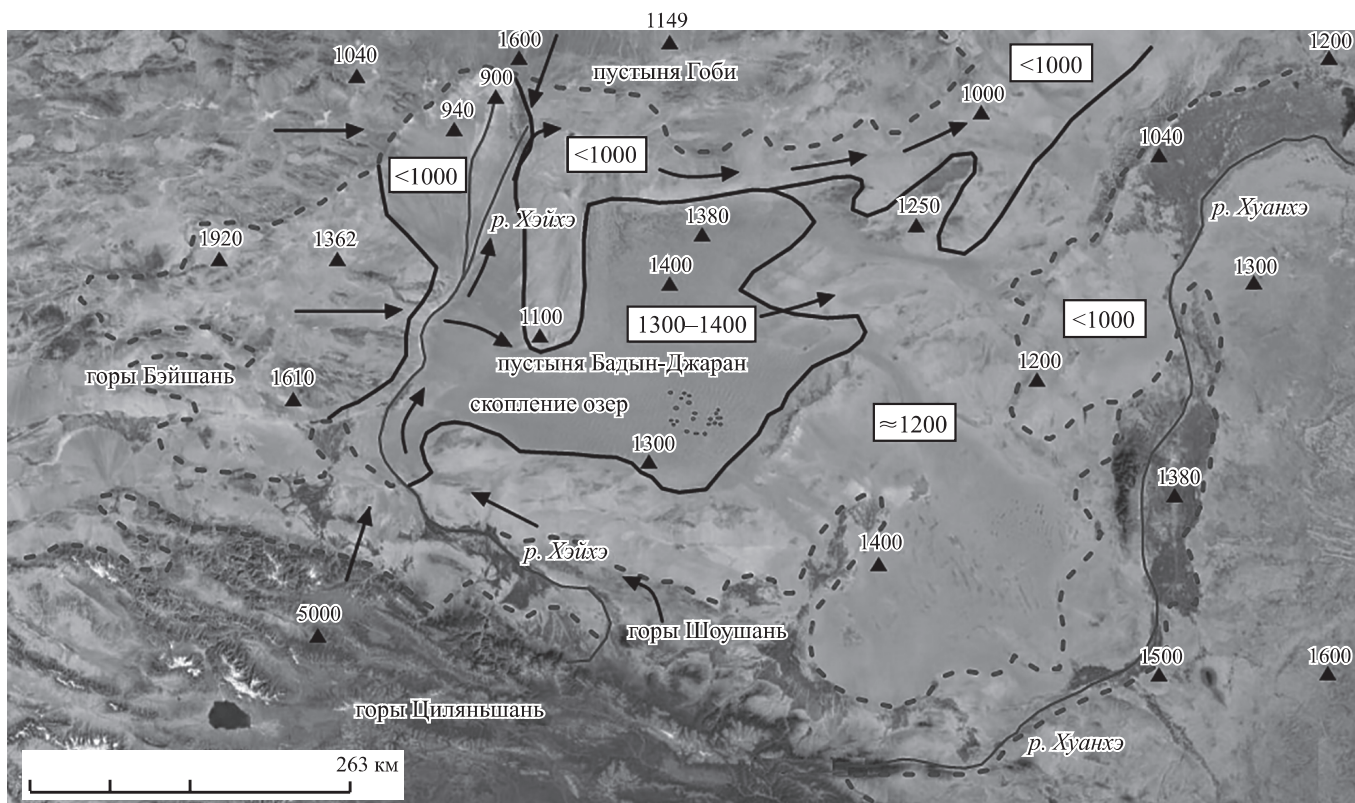
В литературных источниках [1, 4, 6] принято отрицательные с позиций гидрогеологического строения геологические структуры платформ,

плит, горно-складчатых областей относить к артезианским бассейнам безотносительно к географическому их положению. В крупном плане среди артезианских бассейнов, исходя из геологических предпосылок, различают артезианские бассейны платформенного типа и межгорные артезианские бассейны, приуроченные к горно-складчатым областям [1]. Межгорные артезианские бассейны имеют свои структурные гидрогеологические особенности. В частности, в отличие от артезианских бассейнов платформенного типа, характеризующихся этажностью и слоистостью гидрогеологических условий в вертикальном разрезе, бассейнам межгорного типа часто свойственно единое структурное состояние и близкое к хаотичному распределение частиц пород разного размера, т.е. межгорный артезианский бассейн часто представляет собой единое геологическое тело, не поддающееся стратификационному расчленению.

В целом территория впадины Хэйхэ и приуроченная к ней долина р. Хэйхэ изучены слабо, представленные в литературных изданиях гидрогеологические вопросы в основном дискуссионны. Это, возможно, связано со сложностью ее условий.

К сожалению, отсутствуют достоверные сведения о характере гидрогеологического строения территории впадины и данные о ее границах. По мнению ряда авторов [7, 8], впадина Хэйхэ

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Национальной программы фундаментальных исследований Китая (Программа 973) (№ 2009CB421305), Национального фонда естественных наук Китая (№ 91025023 и 41271049), Программы NSFC-RFBR 2013 – 2014 (грант № 13-05-91161-ГФЕН_а).



Условные обозначения:



Рис. 1. Обзорная схема расположения межгорного артезианского бассейна Хэйхэ на территории северо-западной части Китая и основных условий питания и разгрузки подземных вод (составлено Е. И. Барановской, К. Е. Питьевой): 1 – внешняя граница артезианского бассейна Хэйхэ; 2 – внутренняя граница артезианского бассейна Хэйхэ; 3 – направление движения потоков подземных вод; 4 – отметка рельефа земной поверхности, абс. м; 5 – средняя отметка рельефа земной поверхности на различных участках, абс. м; 6 – скопление озер; 7 – река.

осложнена двумя депрессиями: южной в предгорьях Циляншань (отметки земной поверхности от 1450 до 2000 м) и Эцзина, протянувшейся в северном направлении от южной части пустыни Бадын-Джаран вдоль западных ее частей до озер, расположенных на севере рассматриваемой территории. По мнению авторов работ [7, 8], эти депрессии образуют не связанные друг с другом артезианские суббассейны. Подземные воды южного суббассейна формируются за счет горного питания и полностью разгружаются родниками в пределах предгорий Циляншань по зонам высокой трещиноватости и дренированием р. Хэйхэ. Таким образом, исключается взаимосвязь южного и северного суббассейнов [7, 8].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На территории Эцзина в настоящее время Институтом географии и природных ресурсов Китайской академии наук, Центром водных ресурсов Пекинского университета ведутся круп-

ные разноплановые исследования с изучением натурального полевого материала по гидрогеодинамическим, гидрогеохимическим теоретическим и прикладным вопросам на основе методики стабильных изотопов.

Работа, результаты которой представлены в настоящей статье, а также исследования по другим гидрогеологическим проблемам артезианского бассейна Хэйхэ выполнены по фактическим гидрогеологическим данным, предоставленным Институтом географии и природных ресурсов Китайской академии наук кафедре гидрогеологии МГУ им. М. В. Ломоносова в рамках гранта Национального фонда естественных наук Китая (ГФЕН). В них вошли сведения об установившихся уровнях и глубинах залегания подземных вод, по минерализации, компонентному составу и pH подземных и поверхностных вод, по гидрогеохимическому режиму и др. Для исследования химического состава вод по разрезу бассейна отбор проб скважин был рассредоточен по всей терри-

тории артезианского бассейна и по разным глубинам. Химический состав поверхностных вод изучался для бассейна р. Хэйхэ и озерам. Представленные академическим институтом Китая данные позволили осуществить систематизацию, классифицирование, составить серию карт, профилей, графиков, таблиц, характеризующих артезианский бассейн Хэйхэ с позиций различных гидрогеологических условий. На их основе по ряду гидрогеологических вопросов получены выводы, некоторые из которых не являются окончательными, так как исследования еще не закончены, а другие, вследствие значительной сложности, пока остаются дискуссионными.

Задачи исследований артезианского бассейна Хэйхэ обусловлены их направленностью с практических позиций проблемных вопросов водоснабжения. В перечень задач в качестве главных входит оценка разносторонних гидрогеологических, в том числе гидрогеохимических условий артезианского бассейна Хэйхэ, которая позволила бы установить закономерности распространения в пределах бассейна подземных вод, пригодных для хозяйственно-питьевого использования.

Гидрогеологические условия любого геологического объекта в целом характеризуются на основе представлений о его строении, в связи с чем главная задача данной статьи – обоснование характера структуры артезианского бассейна Хэйхэ.

Методическая основа исследований структуры артезианского бассейна Хэйхэ, некоторые результаты которых приведены в данной статье, – естественно-исторический анализ натуральных данных, осуществляемый различными приемами систематизации материалов, их обработки и интерпретации. При этом существенное внимание уделено изучению источников питания подземных вод, их транзиту и разгрузке, особенно распространению и формированию пресных вод различного прикладного использования. Обращено серьезное внимание на гидрогеологические условия пустыни Бадын-Джаран, породы которой фиксируются некоторыми геолого-гидрогеологическими признаками, в частности, по космическим съемкам, как водоносные.

Наиболее широко используемые приемы естественно-исторического анализа на стадии обработки информативных данных – графоаналитические, картографические и статические построения, а на стадии интерпретации результатов обработки – построения генетического характера. Значимым приемом является генетическое гидрогеохимическое классифицирование [5].

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Климат территории артезианского бассейна Хэйхэ характеризуется, по многолетним данным, средней температурой воздуха 8.1°C (в высокогорье 3–4°C), средним количеством атмосферных осадков в горах до 700 мм/год и больше, в периферийных частях артезианской впадины <500 мм/год, в ее равнинной части – <50–30 мм/год. Максимальное количество осадков приходится на горные участки с высотой 2400–3000 м. На высоте >4000 м над уровнем моря среди осадков преобладают снег, снежники, ледники. Ледники в горах занимают площадь ~421 км² и залегают выше отметки 4500 м над уровнем моря.

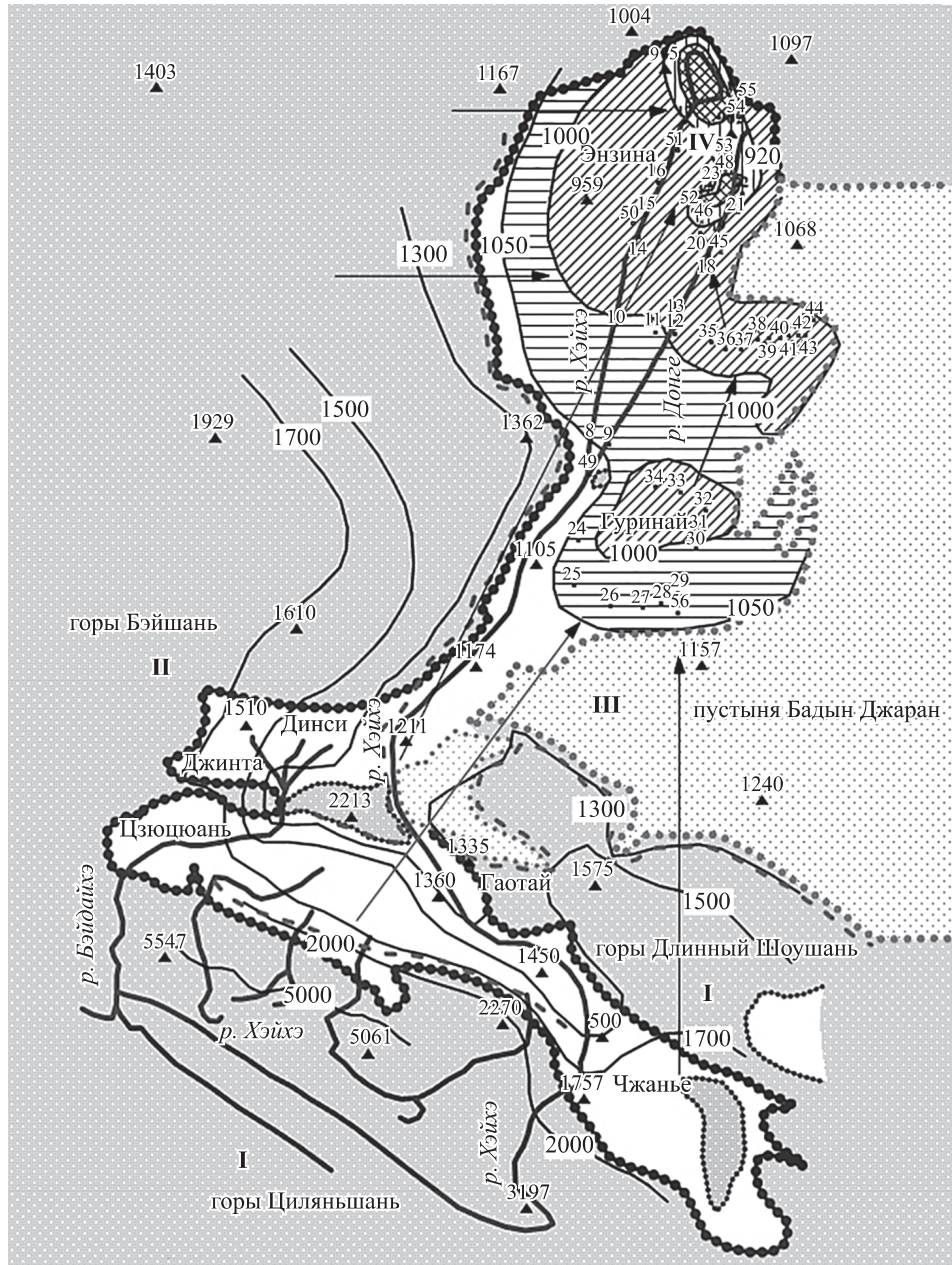
Многолетняя испаряемость в пределах юго-западной горной системы ~700 мм/год; в пределах впадины – до 2000 мм/год [2, 3].

При высоте >4000 м над уровнем моря растительности практически нет, встречаются растения-подушки. Луга и кустарники встречаются на отметке ниже 3300 абс. м.

С запада и северо-запада артезианской впадины высота гор снижается до 2500–1400 м (рис. 2). Водосборная площадь в высокогорной части Цилиньшань ~2920 км². Воды поглощаются пролювиальным шлейфом.

С юга артезианскую впадину Хэйхэ от горной системы Шоушань отделяет пустыня Бадын-Джаран. Горы Шоушань с отметками земной поверхности 1575 абс. м являются питающей (подземным и поверхностным стоком) провинцией артезианского бассейна Хэйхэ в его юго-восточной и южной частях. Подземные воды предгорного шлейфа приурочены к абсолютным отметкам ~1300 м и оконтуривают его по границе с пустыней Бадын-Джаран, характеризующейся значительным (~150 м) уклоном в сторону артезианской впадины Хэйхэ и не препятствующей вследствие этого потокам горных вод (рис. 2).

Гидрографические условия рассматриваются с позиций речного влияния на формирование подземных вод артезианского бассейна Хэйхэ. В литературных источниках упоминается о сезонном поступлении воды р. Хэйхэ в подземные воды. Но в то же время указывается на слабую изученность взаимосвязи подземных и речных вод. Высказывается мнение о том, что подземные и поверхностные воды, формирующиеся в южной системе Цилиньшань, не поступают в пределы артезианского бассейна Хэйхэ, так как полностью раз-



Условные обозначения:

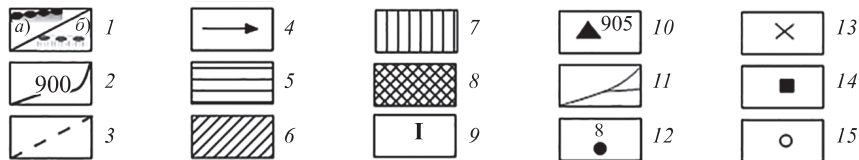


Рис. 2. Схематическая карта геологических структур и рельефа земной поверхности межгорного артезианского бассейна Хэйхэ (составлено Е. И. Барановской, К. Е. Питьевой): 1 – обрамление впадины Хэйхэ: а – горами, б – пустыней; 2 – изолиния рельефа земной поверхности, абс. м; 3 – внутренняя граница территории межгорного артезианского бассейна Хэйхэ; 4 – направление регионального понижения рельефа земной поверхности; 5–8 – участки с различными отметками рельефа (м): 5 – 1050–1000, 6 – 1000–920, 7 – 920–900, 8 – <900; 9 – геологические блоки: I – горы Цзяньшань, Шоушань; II – горы Бэйшань; III – пустыня Бадын-Джаран; IV – межгорная впадина; 10 – отметка рельефа земной поверхности, абс. м; 11 – река Хэйхэ; 12 – номер скважины; 13–15 – наблюдательные скважины с глубиной <20, 20–100, >100 м.

гружаются через родники и поверхностный сток у подножия гор в трещиноватые породы [7–9].

В пределах горного окружения бассейна большинство притоков сезонные и недолговечные. Семнадцать малых рек с общим стоком 3.44×10^9 м³/год берут начало в горах Циляншань [9].

Река Хэйхэ берет начало в вершинной части горного массива Циляншань, является водной до северных границ рассматриваемого артезианского бассейна; впадает в озера Восточное и Западное Джуан в северной части территории бассейна (рис. 2). В районе истоков р. Хэйхэ абсолютные отметки земной поверхности 2000–5000 м над уровнем моря, среднегодовая температура $\sim 3\text{--}4^\circ\text{C}$.

Орографические условия выражены через рельеф земной поверхности, который в пределах впадины Хэйхэ, следуя ее геологическому строению, характеризуется погружением с юго-запада на северо-восток к обширной глубокой внутрибассейновой депрессии. Абсолютные отметки поверхности по данным триангуляционных пунктов и устьев скважин изменяются с юга на север и северо-восток от ~ 1500 до ~ 900 м. Напорный градиент подземных вод на локальных участках достигает 30–50 м (рис. 3).

Рельеф центральной части впадины Хэйхэ отражает ее общее погружение. Минимальные изолинии рельефа земной поверхности приурочены к крайней северо-восточной окраине впадины с отметками ≈ 900 абс. м (рис. 2).

К настоящему времени у нас сложилось определенное представление о наличии взаимосвязи подземных вод южной и северной депрессий впадины Хэйхэ (от истоков р. Хэйхэ до ее низовий, включая северо-восточное максимальное ее погружение). Это представление не совпадает с мнениями, изложенными в литературных и фондовых материалах более ранних исследований [7, 8]. По данным китайских ученых, северной границей южной депрессии являются горная область, где разгрузка подземных вод осуществляется исключительно через родники, и долина р. Хэйхэ, где разгрузка подземных вод происходит посредством полного дренирования рекой [7, 8].

В качестве подтверждений нашего тезиса о наличии взаимосвязи южной и северной депрессий мы определили следующее: *большая часть земной поверхности территории южной депрессии (западнее р. Хэйхэ), примыкающая к предгорьям Циляншань, близка к отметкам 2000 м и сни-*

жается до 1500–1400 м в долине р. Хэйхэ. Далее к северу земная поверхность продолжает понижаться, достигая ~ 1300 абс. м в районе Гаотай и северных склонов Шоушань. В пределах примыкающей к горам Шоушань пустыни Бадын-Джаран земная поверхность понижается до 1050 м, принимая к северным границам впадины отметки до 910–900 абс. м (рис. 2).

Основываясь на соответствии уровня подземных вод рельефу земной поверхности (рис. 2–4), приходим к заключению о единстве их потоков на территории от предгорий Циляншань к основной области разгрузки на севере бассейна. Река Хэйхэ, имея истоки в пределах высокогорного кряжа Циляншань и имея северо-восточное направление течения, является общей для южной и северной депрессий. Геологические условия, представленные однотипностью геологических структур (горные массивы, межгорные депрессии, впадины), временной однозначностью тектонического развития структур, заключающейся в воздымании гор и погружении межгорных пространств, одновременно геологического периода формирования современного геолого-гидрогеологического состояния рассматриваемого бассейна, представленного четвертичным временем, близостью литологического состава рыхлых пород депрессионных участков артезианского бассейна, – свидетельствуют о существенной близости их формирования и об их взаимосвязанности.

Исходя из этого, для дальнейшего рассмотрения гидрогеологического строения артезианского бассейна Хэйхэ необходимо было его оконтурить предварительно как единую геолого-гидрогеологическую систему.

Оконтуривание осуществлено посредством внешних и внутренних границ. Внешние границы при оконтуривании территории артезианского бассейна Хэйхэ горами представлены узколинейными участками, проходящими через горные водоразделы; на юго-западе по отметкам ≈ 5000 м и более, на западе и северо-западе $\sim 2000\text{--}1500$ м, на юго-востоке $\approx 1600\text{--}1500$ м (рис. 1). Восточная граница одна и проходит по ландшафтному показателю. Ландшафт со стороны пустыни Бадын-Джаран характеризуется наличием неподвижных высотой до 500 м дюн с огромным количеством (≈ 100) озер с пресной и соленой водой в междюнном пространстве. Подземные воды, распространенные восточнее артезианского бассейна, достигают территории пустыни, формируясь в горах, расположенных от бассейна Хэйхэ за многие километры. В южной части артезианского бассейна подземные воды в пределы пустыни Бадын-Джа-

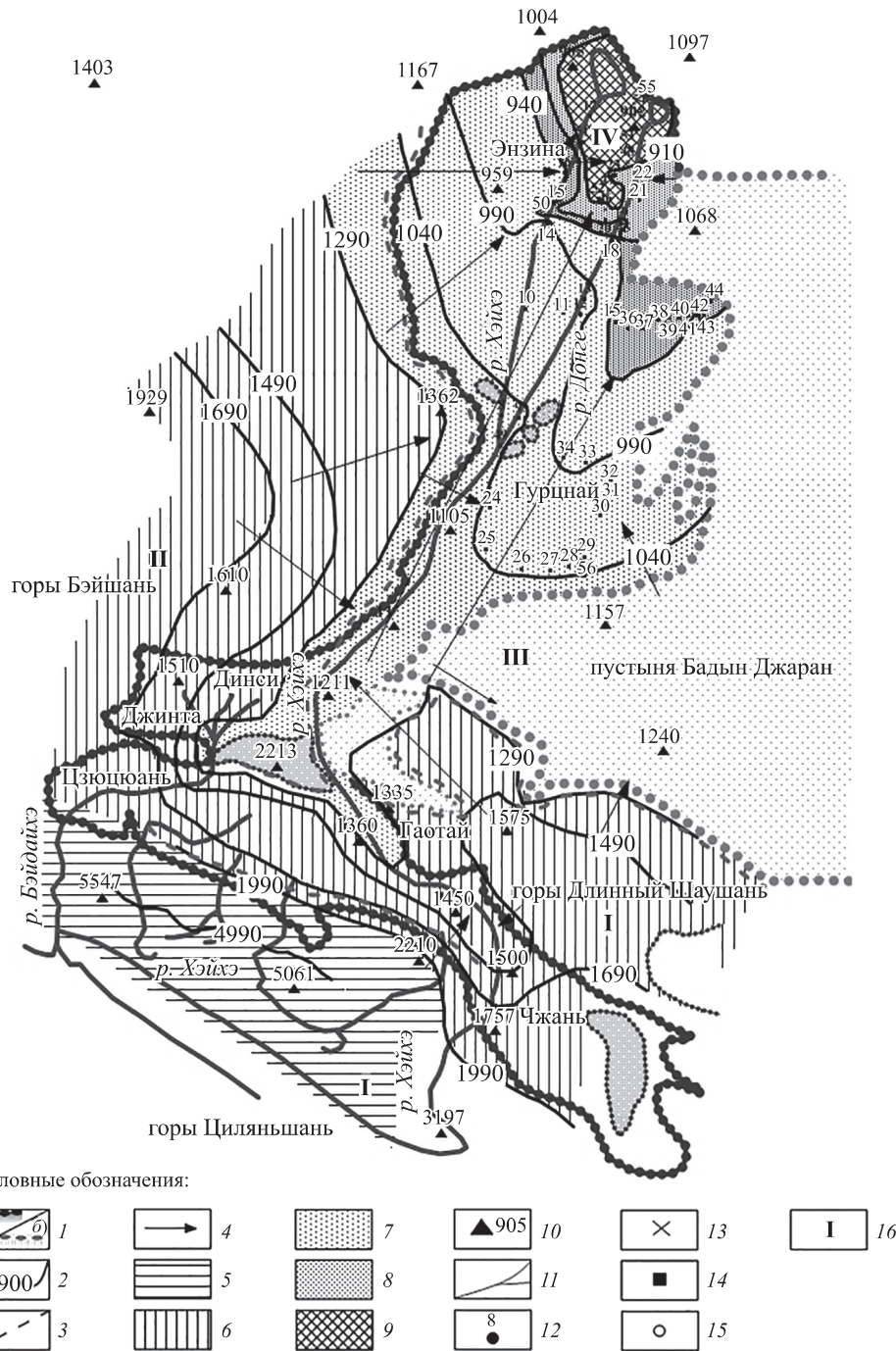


Рис. 3. Схематическая гидрогеологическая карта межгорного артезианского бассейна Хэйхэ (составлено Е. И. Барановской, К. Е. Питьевой): 1 – обрамление впадины Хэйхэ, а – горами, б – пустыней; 2 – гидроизогиписа и ее отметка, абс. м; 3 – внутренняя граница межгорного артезианского бассейна Хэйхэ; 4 – основные направления потоков подземных вод; 5–9 – участки с различными отметками установившегося уровня подземных вод; 5 – область горного питания подземных вод (>1040 м); область транзита подземных вод; 6 – 1040–990 м, 7 – 990–940 м, 8 – 940–910 м; 9 – область региональной разгрузки (<910 м); 10 – отметка рельефа земной поверхности, абс. м; 11 – река Хэйхэ; 12 – номер скважины; 13–15 – наблюдательные скважины с глубиной <20, 20–100, >100 м; 16 – геологические блоки с различными гидрогеологическими условиями: I – горы Цзяньшань, Шоушань; II – горы Бэйшань; III – пустыня Бадын-Джаран; IV – межгорная впадина.

ран поступают со стороны гор Шоушань. Ландшафты артезианского бассейна на востоке близки к степным.

Северная граница рассматриваемого артезианского бассейна – полоса пониженного релье-

фа (≈1000 абс. м и менее), близкого к широтному протяжению (рис. 1). В пределах этой полосы встречаются потоки подземных вод с территории бассейна Хэйхэ и горной части Монгольского Гоби. Далее смеси этих потоков движутся широт-

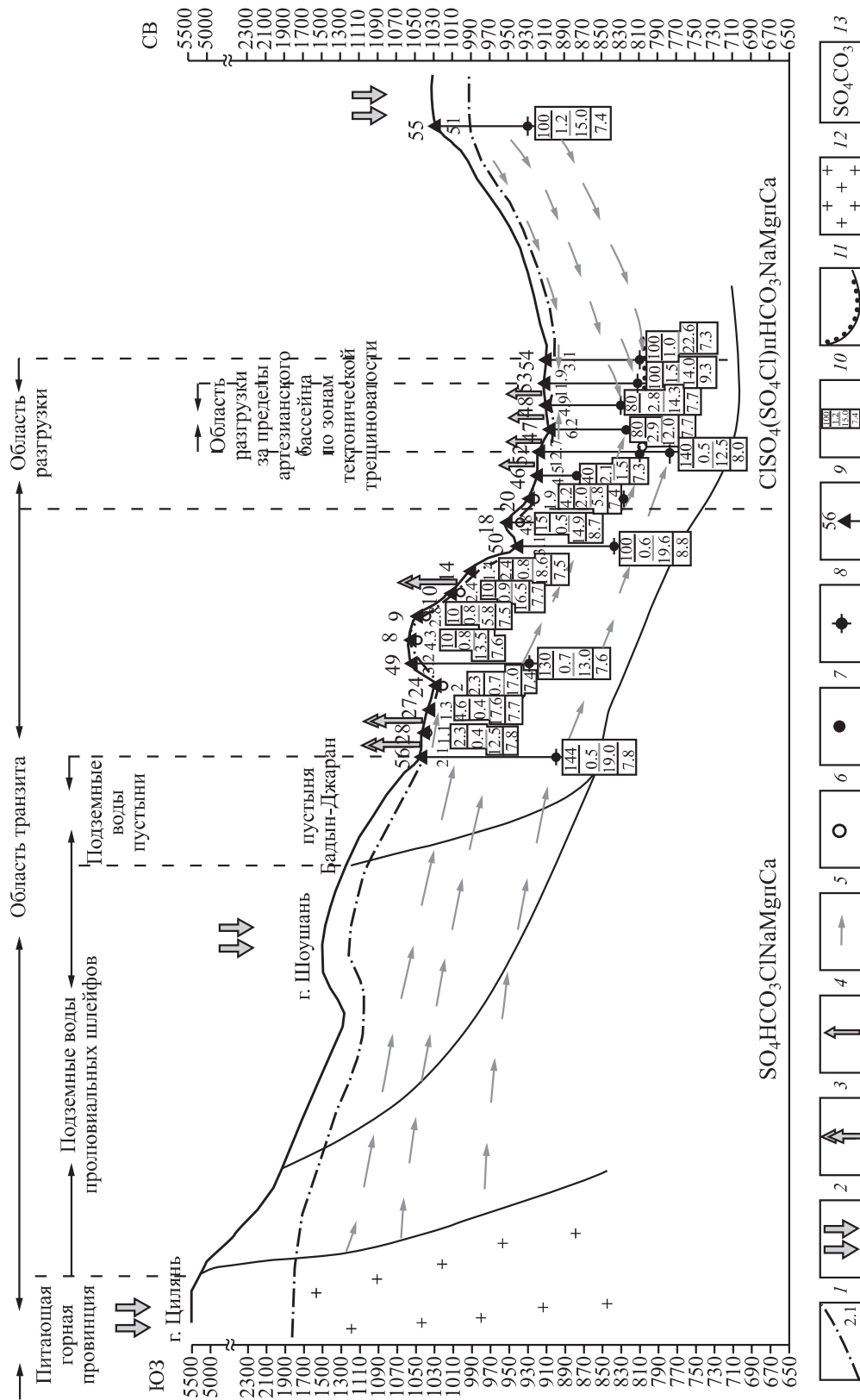


Рис. 4. Профильная гидрогеологическая характеристика территории артезианского бассейна, приуроченной к южной области транзита и долине р. Хэйхэ, подземные воды которой образуют в комплексе с водами предгорных шлейфов и пустыни крупных массив пригодных для хозяйственных нужд вод (кроме участка внутрибассейновой впадины до глубины около 80–100 м). Составлено Е. И. Барановской, К. Е. Питыевой: 1 – уровень залегания подземных вод и его отметка, м; 2 – атмосферные осадки; 3 – региональное испарение; 4 – интенсивное испарение; 5 – направление потоков подземных вод; 6 – глубина отбора пробы <20 м; 7 – глубина отбора пробы от 20 до 100 м; 8 – скважина и ее номер; 9 – значение глубины отбора проб, м; минерализации, г/л; температуры, °С; рН подземных вод; 10 – граница распространения подземных вод с минерализацией >1.0 г/л; 11 – фундамент; 12 – фундамент; 13 – химический состав подземных вод.

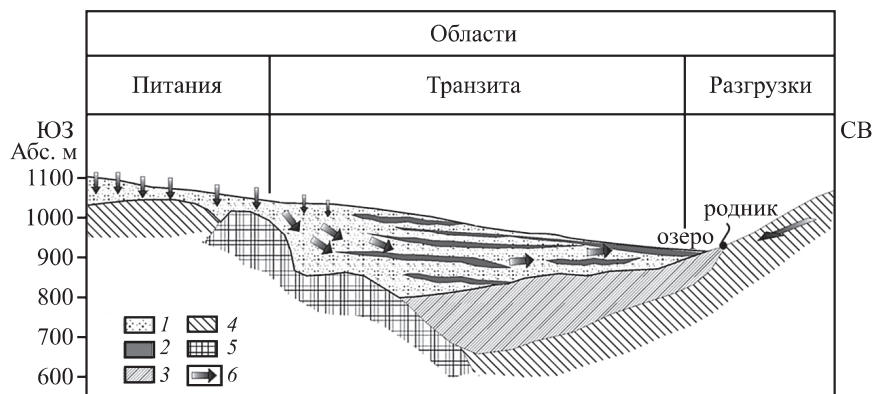


Рис. 5. Гидрогеологическая схема артезианского бассейна Хэйхэ [8, 9]: 1–5 – отложения: 1 – пески, галька четвертичного возраста; 2 – глины четвертичного возраста; 3 – аргиллиты мелового возраста; 4 – песчаники юрского возраста; 5 – гнейсы протерозойского возраста; 6 – потоки подземных вод.

но к долине р. Хуанхэ и, не достигая р. Хуанхэ, направляются на северо-восток в пониженную часть Монгольского Гоби (рис. 1).

Внутренние границы имеют место в пределах горного обрамления артезианского бассейна и приурочены к сочленению с горами пролювиальных шлейфов, образуя провинции горного питания подземных вод бассейна (рис. 1).

На юго-западе в пределах горного массива Циляншань внутренняя граница проходит по абсолютным отметкам, составляющим ~2000 м. На широте Гаотай граница поднимается на север до сочленения с пустыней Бадын-Джаран, а далее по отметкам ~1300 абс. м продолжается по предгорью Шоушань (рис. 2). Западная внутренняя граница артезианского бассейна соответствует предгорным шлейфам в основном гор Бэйшань, и приурочена к абсолютным отметкам ≈1300 м. На востоке артезианский бассейн граничит по абсолютным отметкам ~1000 м с пустыней. На крайнем северо-востоке граница незначительно снижается (рис. 2).

К настоящему времени нами выявлены дополнительные гидрогеологические показатели структурного единства артезианского бассейна Хэйхэ. Далее они рассматриваются в описанных выше границах.

1. Отсутствие в толще терригенных рыхлых образований артезианского бассейна водоупорных слоев региональной протяженности, которые могли бы послужить обоснованием для гидрогеологической стратификации вертикального разреза бассейна (рис. 5). Данное положение составлено на основе обобщения в гидрогеологической литературе сведений о характере распределения в рыхлых породах впадины Хэйхэ частиц разного

размера. Практически все они сводятся однозначно к мнению об отсутствии закономерного их распределения [2, 3, 7, 8]. В единичных случаях указывается на наличие в породах глинистых слоев незначительной мощности и протяженности [9]. Также есть указания на существенную илистую отложений в северо-восточной, погруженной части бассейна Хэйхэ (схематично представлено на рис. 5).

2. Практическое отсутствие закономерного распределения геофильтрационных свойств пород в пределах бассейна. Распределение фильтрационных свойств песчаных и глинистых разновидностей пород в плане и разрезе бассейна в основном не закономерное-хаотичное. На этом фоне в схематическом виде просматриваются: более плотное с глубиной сложение рыхлых пород частицами различного гранулометрического состава; уменьшение размеров частиц рыхлых пород к центральным районам бассейна (рис. 5).

3. Общая территориальная приуроченность уровня залегания подземных вод, отобранных на гидрогеологические исследования с различных (от <1.0 до ≈200 м) глубин разреза бассейна, относится к глубинам от ≈1.0 до ≈3.0 м, т.е. к глубинам, близким к земной поверхности. В единичных случаях глубины залегания подземных вод увеличены до 5.0–12.0 м (рис. 4).

4. Закономерное распределение глубин залегания подземных вод относительно различных гидрогеологических условий бассейна: предгорных пролювиальных отложений до 100.0 м и более; областей транзита преимущественно до 3.0 м; области внутрибассейновой разгрузочной впадины – от 4.0–6.0 до 12.0–13.0 м (рис. 4).

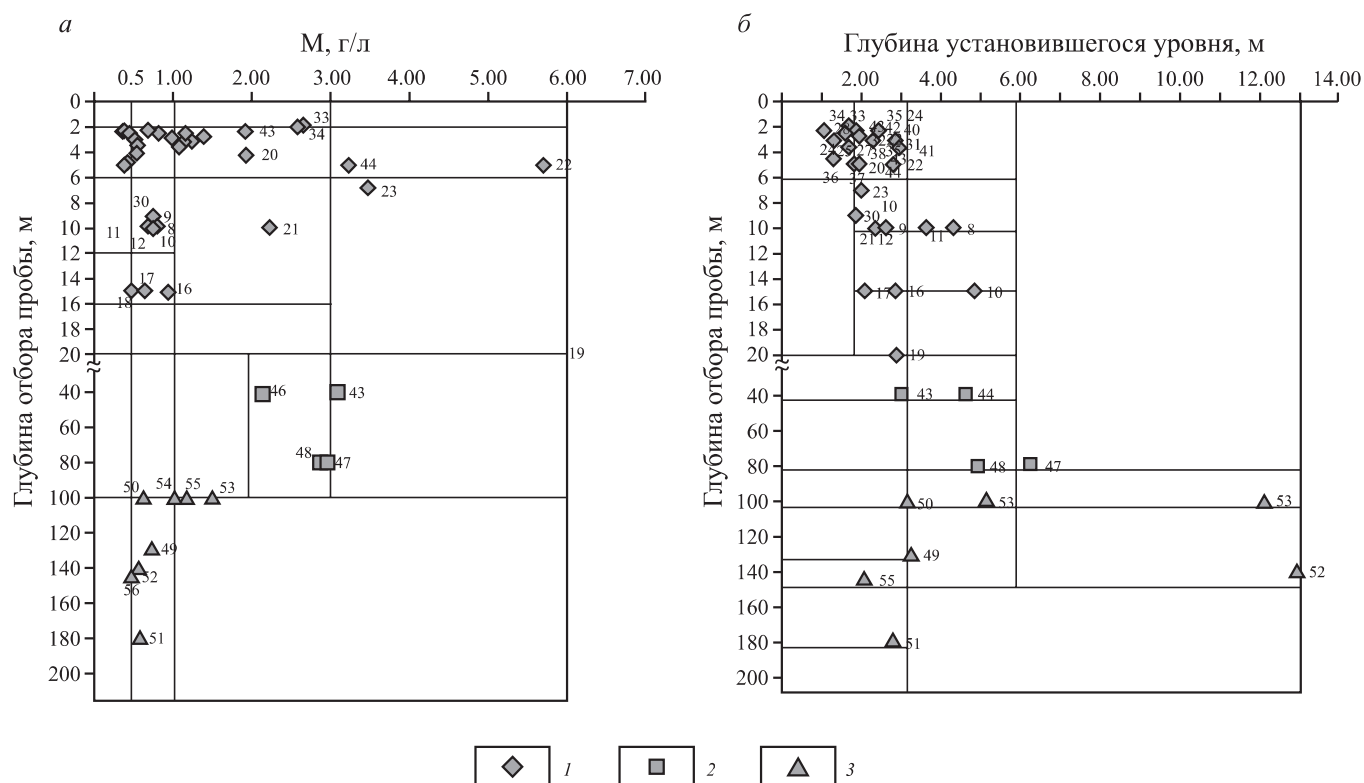


Рис. 6. Распределение в разрезе артезианского бассейна Хэйхэ подземных вод с различными: *a* – минерализацией; *б* – глубинами залегания: 1 – глубина отбора пробы до 20 м; 2 – глубина отбора пробы от 20 до 100 м; 3 – глубина отбора пробы более 100 м.

5. Единство направленности потоков подземных вод артезианского бассейна на любых глубинах его разреза от областей питания к внутрибассейновой северо-восточной депрессии (рис. 3). Оно подтверждается идентичностью данных об абсолютных отметках и направленности потоков подземных вод на северо-западном, западном, северо-восточном, центральном и южном участках артезианского бассейна, полученных на каждом из участков для уровня поверхности вод и для глубин опробования в пределах >100 м (рис. 3 и 4).

6. Сосредоточение разгрузки подземных вод в плане и разрезе всего артезианского бассейна к единой разгрузочной внутрибассейновой впадине на северо-востоке территории.

7. Сосредоточение минерализации подземных вод, отобранных в разных частях бассейна на разных глубинах (от <1.0 до 180 м) в пределах до 1.0 г/л. Минерализованные воды сосредоточены во внутрибассейновой впадине и в пределах незначительных глубин их залегания (рис. 4 и 6).

8. Однозначность минерализации и компонентного состава подземных вод, отобранных в пределах отдельных участков артезианского бассей-

на Хэйхэ с глубин, в пределах каждого участка, близких уровню залегания, и с глубин (40, 80, 100, 130, 140, 144 и 180 м) (рис. 4).

9. Единая для подземных вод всего (в плане и разрезе) артезианского бассейна Хэйхэ средняя температура $\approx 17^\circ\text{C}$. Минимальные температуры приурочены к подземным водам, характеризующимся значительной связью с горным питанием, максимальные – к подземным водам, граничащим с пустыней; приуроченным к понижениям в рельефе земной поверхности и приозерным участкам (рис. 4).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основании изложенного возникло представление о том, что межгорный артезианский бассейн Хэйхэ представляет собой в структурном отношении единую гидрогеологическую систему, характеризующуюся общностью значимо взаимосвязанных и взаимообусловленных гидрогеологических условий, свойств и пространственно-временных трансформаций, весь комплекс которых сформировался на основе исторически сложившихся геологических, климатолого-ланд-

шафтных, гидрологических и термодинамических обстановок.

С позиций характера гидрогеологических условий данный единый в структурном отношении геолого-гидрогеологический объект близок к водоносному комплексу грунтового типа, возникшему и развившемуся на основе мощных грабенообразных геологических процессов в аридных ландшафтно-климатических условиях при окружении горными кряжами и пустынями; характеризуется значительными размерами в плане и разрезе, сложными гидрогеодинамической и гидрогеохимической обстановками.

Главные факторы, обусловившие направление гидрогеологического развития территории межгорного артезианского бассейна Хэйхэ, следующие.

1. Геологические, представленные: а) тектоническими подвижками, вызвавшими в четвертичное время подъем до 5.5 км и более над уровнем моря горных сооружений и образование обширной по площади и глубине межгорной впадины; б) заполнением впадины рыхлыми терригенными различного гранулометрического состава породами, характеризующимися общим для территории впадины минералого-геохимическим составом, соответствующим составу разрушающихся горных пород. Горы, окружающие впадину Хэйхэ, характеризуются преимущественно палеозойской и мезозойской складчатостью, особенно это относится к Циляншань. Они представлены: палеозойские – метаморфическими породами, гнейсами, вулканическими; мезозойские – песчаниками, алевролитами, андезитом. Рыхлые породы – в значительной части пролювиальные образования, существенно озерные, речные гравийно-галечниковые отложения. Породы фундамента толще рыхлых отложений южной, примыкающей к Циляншань депрессии артезианского бассейна Хэйхэ представлены метаморфизованными осадочными отложениями, метаморфическими и вулканогенными образованиями от нижнего палеозоя до неогена [2, 3]. В депрессии Эцина подошвой рыхлых отложений являются меловые плотные песчаники, аргиллиты, юрские глины, гнейсы синийского комплекса, которые условно нами принимаются за фундамент (рис. 5). Глубина залегания фундамента на территории артезианского бассейна Хэйхэ в целом изменяется от 100 до 500–800 м, распределение неравномерно.

2. Климатические факторы представлены: а) высокими (до 8°C) многолетними температурами, вызывающими при незначительных глу-

бинах залегания подземных вод их испарение, способствующее интенсификации процессов накопления в водах высокорастворимых соединений (преимущественно хлоридных) и приводящих к формированию их существенной минерализации; б) незначительными величинами атмосферных осадков (на территории центральной, северной и северо-восточной окраин территории артезианского бассейна они существенно меньше 50 мм/г), выпадающих непосредственно в пределах равнинных территорий бассейна.

3. Гидрогеологические условия, особенно условия питания, транзита и разгрузки подземных вод артезианского бассейна Хэйхэ. Основное питание подземных вод – горное, а также речное. О преобладании горного питания свидетельствуют низкие температуры подземных вод, близкие к температурам подземных вод поверхностного стока горных питающих провинций. Другим подтверждением значимой роли горного питания подземных вод артезианского бассейна Хэйхэ являются незначительные (≈ 0.5 и менее) величины минерализации подземных вод. Оба эти показателя свойственны подземным водам различных частей разреза артезианского бассейна и различных участков бассейна в плане. Из горного питания наиболее интенсивно представлена питающая провинция, приуроченная к горному сооружению Циляншань.

В горных условиях широко развиты подземные и речные воды, а также поверхностный сток. Источники подземных вод в высокогорных условиях – снежники и ледники; в среднегорьях и низкогорьях – снег сезонного снежного покрова. За их счет формируются многоводные потоки подземных и поверхностных вод. Эти источники питают подземные воды предгорных пролювиальных шлейфов, формирующихся в верхних частях конусов выноса. Ниже по потокам, главным образом в средних частях горных склонов, вследствие неровностей горного рельефа и уменьшения фильтрационных свойств пород происходит частичная разгрузка подземных вод в виде родников.

Воды горного сооружения Циляншань для артезианского бассейна Хэйхэ – основное питание. Они устремляются сначала в южную депрессию Гаотай и в наиболее низкой ее части движутся на северо-восток к оазису Эцина.

Для горных условий характерны высокие напорные градиенты и скорости фильтрации подземных вод, интенсивные поверхностные и речные стоки [2, 3]. Особенно это значимо для

периода таяния снегов, снежников и ледников. В это время создаются благоприятные условия для интенсивного поступления вод в пределы всего артезианского бассейна в виде речного и подземного стоков.

Переход от потока подземных вод высокогорных частей Циляншань и предгорного шлейфа к потоку в пределах равнинной части артезианского бассейна Хэйхэ характеризуется резким уменьшением глубин их залегания (от >100 до 20–10 м и менее), величин напорных градиентов и скоростей фильтрации вод.

Речное питание действует не на всей территории артезианского бассейна Хэйхэ, ограничиваясь западной его частью и распространяясь в восточном направлении к центральным частям бассейна. Его роль особенно значима в формировании повышенной (но остающейся <1.0 г/л) минерализации подземных вод и существенной их гидрокарбонатности. То и другое в значительной степени – результат восстановления органическими соединениями в речных условиях сульфатов с образованием гидрокарбоната и углекислотного выщелачивания пород в условиях повышенных концентраций CO_2 (идет интенсивное окисление органических веществ кислородом воздуха).

Питание со стороны пустыни Бадын-Джаран очень слабое. На юге и юго-востоке подземные воды пустыни Бадын-Джаран представлены водами в основном предгорного пролювия Шоушань. Это низкогорье, пролювий развит незначительно; погружение пустыни от гор Шоушань ~200 м, что определяет вследствие существенных напорных градиентов большие скорости фильтрации вод, движущихся через пустыню к равнинам артезианского бассейна, и определяет слабые изменения в составе подземных вод пустыни. Этим объясняются незначительная (<0.5 г/л) минерализация и низкие (~11.5–13.5 и несколько более) температуры подземных вод в южной части артезианского бассейна. В восточной части артезианского бассейна, граничащего с пустыней Бадын-Джаран, на большом протяжении о слабом влиянии вод пустыни на воды артезианского бассейна свидетельствуют: отличия минерализации и температуры вод бассейна от вод пустыни. Воды бассейна ≤ 0.5 г/л, температуры низкие, значительно ниже средних многолетних (~17°C), тогда как воды пустыни не только пресные, но и минерализованные, температуры высокие. Как указано выше, питание подземных вод восточной части бассейна горное, в значительной степени со стороны Циляншань.

Подземные воды области транзита, охватывающие практически всю территорию артезианского бассейна Хэйхэ, вследствие сложных неоднозначных гидрогеологических условий имеют неоднозначный химический состав. В крупном плане следует указать на две группы подземных вод, характеризующихся своеобразием химического состава. В первую группу входят подземные воды слабой трансформации в области транзита и сохраняющие в значительной степени состав, довольно близкий к составу вод горных питающих провинций. Они имеют широкое распространение в плане и разрезе артезианского бассейна и свидетельствуют о существенной роли в формировании вод бассейна горного питания.

Подземные воды второй группы ощущают на себе влияние процессов взаимодействия с породами и отличаются от вод первой группы увеличенной минерализацией (в пределах пресных вод) и различным компонентным составом. Воды гидрокарбонатные приурочены к западной приречной части области транзита и образуют от уровня залегания вод толщу, мощностью ~5–6 м.

Процессы взаимодействия с породами – углекислотное выщелачивание с образованием хорошо растворимых органоминеральных соединений, а также сульфатредукция.

Воды сульфатно-гидрокарбонатные с пониженным хлором приурочены к северо-западу бассейна. Имеют значительную площадь достижения от горного питания (горы Бейшань) р. Хэйхэ. Это способствует длительному времени взаимодействия их с породами, процессам окисления сульфидов пород и формированию преобладания сульфата над гидрокарбонатами, в целом формированию повышенной минерализации.

Разгрузка подземных вод преимущественно сосредоточена в северо-восточной части артезианского бассейна. Региональная разгрузка имеет место, но в пределах тех участков бассейна, где глубины залегания вод не превышают 3.0 м (рис. 4). В разных частях бассейна рельеф земной поверхности понижен и глубина залегания вод уменьшается до <3.0–2.0 м. За счет интенсивного испарения на этих участках формируются линзы вод с минерализацией >1.0 г/л (до 2.0–3.0 г/л).

В пределах впадины на участках, характеризующихся глубинами залегания вод <2.0 м, воды разгружаются в атмосферу посредством испарения. На участках впадины с глубинами залегания вод >5.0–6.0 (скважины 47, 48) и ~11.0–13.0 м (скважины 52, 53) подземные воды выносятся по зонам трещиноватых пород за пределами ар-

тезианского бассейна (рис. 4). Подземные воды артезианского бассейна Хэйхэ направляются на восток-северо-восток в сторону пониженных в рельефе участков Монгольского Гоби.

ВЫВОДЫ

В структурном отношении артезианский бассейн Хэйхэ представляет собой межгорную впадину, сформировавшуюся в четвертичное время вследствие интенсивного и неравномерного опускания части обширной Гобийской депрессии. В связи с разрушением пород горных массивов впадина была заполнена рыхлыми песчано-глинистыми разностями терригенных отложений, образовав мощную в несколько сотен метров водоносную толщу.

С гидрогеологических позиций, это – водоносный комплекс грунтового типа, возникший и развившийся на основе мощных грабенообразных геологических процессов в аридных ландшафтно-климатических условиях при окружении горными кряжами и пустынями. Характеризуется значительными размерами в плане и разрезе, сложными обще-гидрогеологической, гидрогеодинамической и гидрогеохимической обстановками.

Главные факторы, обусловившие направление гидрогеологического развития территории артезианской впадины Хэйхэ, геологические, климатические и гидрогеологические, среди которых основными являются условия питания подземных вод, способствующие преобладанию в пределах артезианского бассейна Хэйхэ пресных подземных вод различного компонентного состава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Всеволожский В. А.* Основы гидрогеологии. М.: Изд-во МГУ, 2007. С. 448.
2. *Вэй Лэй.* Формирование питания подземных вод межгорного артезианского бассейна Хэйхэ // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2010. № 2. С. 81–84.
3. *Вэй Лэй.* Изучение условий формирования подземных вод и оценка их естественных ресурсов межгорного артезианского бассейна Хэйхэ (КНР) // Матер. XVII Междунар. научн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2010». Сек. Геология, подсекция Гидрогеология (12–15 апреля, МГУ). [Электронный ресурс]. М.: Макс-Пресс, 2010.
4. *Кирюхин В. А., Коротков А. И., Шварцев С. Л.* Гидрогеохимия. М.: Недра, 1993. С. 384.
5. *Питьева К. Е.* Гидрогеохимия. М.: Изд-во МГУ, 1988. С. 316.

6. *Шварцев С. Л.* Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1998. С. 366.
7. *Chen Zongyu, Nie Zhenlong, Zhang Guanghui et al.* Environmental isotopic study on the recharge and residence time of groundwater in the Heihe River Basin, northwestern China // J. Hydrogeology. 2006. V. 14. № 8. P. 1635–1651.
8. *Qin Dajun, Zhao Zhanfeng, Han Liangfeng et al.* Determination of groundwater recharge regime and flowpath in the Lower Heihe River basin in an arid area of Northwest China by using environmental tracers: Implications for vegetation degradation in the Ejina Oasis // Appl. Geochem. 2012. V. 27. № 6. P. 1133–1145.
9. *Wang Ping, Yu Jingjie, Zhang Yichi, Liu Changming.* Groundwater recharge and hydrogeochemical evolution in the Ejina Basin, northwest China // J. Hydrology. 2013. V. 476. P. 72–86.

REFERENCES

1. Vsevolozhskii, V. A. *Osnovy gidrogeologii* [Fundamentals of hydrogeology]. Moscow, izd. Mosk. gos. univ., 2007, pp. 448 (in Russian).
2. Wei, Lei *Formirovanie pitaniya podzemnykh vod mezhgornogo artezianskogo basseina Kheikhe* [The formation of groundwater intermountain Heihe artesian basin]. *Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya 4, Geologiya*, 2010, no. 2, pp. 81–84 (in Russian).
3. Wei, Lei [The study of groundwater formation conditions and assessment of groundwater resources in the intermountain Heihe artesian basin (China)]. *Materialy XVII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "Lomonosov-2010". Sektsiya geologiya, podseksiya gidrogeologiya (12–15 aprelya, MGU)* [Proc. the XVII Intern. sci. conf. students, postgraduates and young professionals "Lomonosov-2010". The Geology section, Hydrogeology subsection (12–15 April, MSU)]. [Electronic resource]. Moscow, 2010 (in Russian).
4. Kiryukhin, V.A., Korotkov, A.I., Shvartsev, S. L. *Gidrogeokhimiya* [Hydrogeochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1993, p. 384 (in Russian).
5. Pitjeva, K. E. *Gidrogeokhimiya* [Hydrogeochemistry]. Moscow, izd. Mosk. gos. univ., 1988, pp. 316 (in Russian).
6. Shvartsev, S. L. *Gidrogeokhimiya zony gipergeneza* [Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone]. Moscow, Nedra Publ., 1998, p. 366 (in Russian).
7. Chen Zongyu, Nie Zhenlong, Zhang Guanghui, et al. Environmental isotopic study on the recharge and residence time of groundwater in the Heihe River Basin, northwestern China. *Hydrogeology J.*, 2006, vol. 14, no. 8, pp. 1635–1651.
8. Qin Dajun, Zhao Zhanfeng, Han Liangfeng, et al. Determination of groundwater recharge regime and flow-

- path in the Lower Heihe River basin in an arid area of Northwest China by using environmental tracers: Implications for vegetation degradation in the Ejina Oasis. *Appl. Geochem.*, 2012, vol. 27, no. 6, pp. 1133–1145.
9. Wang Ping, Yu Jingjie, Zhang Yichi, Liu Changming, Groundwater recharge and hydrogeochemical evolution in the Ejina Basin, northwest China. *J. Hydrology*, 2013, vol. 476, pp. 72–86.

HYDROGEOLOGICAL STRUCTURE OF THE INTERMOUNTAIN HEIHE ARTESIAN BASIN (CHINA)

E. I. Baranovskaya, K. E. Pitjeva

*Lomonosov Moscow state university,
Leninskie gory, 1, Moscow, 119991 Russian Federation.
E-mail: baranovskaya_kat@mail.ru, kepitjeva@mail.ru*

The article describes the main results in the study of hydrogeological structure in the Heihe artesian basin, located in the northwestern part of China. The basin represents a vast semi-mountainous area characterized by the arid climate and manifesting a significant shortage of drinking water. From the south, west, and north, this area is surrounded by mountains of various height; the territory is of latitudinal strike, and its elevation is lower than that of the bordering mountains. In general, the hydrogeological structure of the Heihe artesian basin is complicated and poorly studied. In particular, the groundwater recharge sources, and the groundwater-river interaction are the principal disputable issues requiring serious theoretical investigation. The main objective of this article focuses at explaining a single structure of the Heihe artesian basin. The main hydrogeological features indicating this structure unity are revealed. As a research methodology in the Heihe artesian basin, we applied the natural-historical analysis, using various methods of natural data systematization, their processing and interpretation. The genetic hydrogeochemical classification is the basic research method. In the article, we also pay significant attention to the sources of groundwater discharge, transit and recharge; as well as the freshwater distribution and formation. We pay much attention to the hydrogeological conditions of the Badain Jaran Desert. According to certain geologic and hydrogeological features and space survey, the rocks in this desert are believed to be water-bearing deposits. The research results permit us to conclude that the intermountain Heihe artesian basin is a single hydrogeological structure with common significantly inter-related and interdependent hydrogeological conditions, properties, and spatial-temporal transformations. The entire complex of these parameters resulted from certain historically prevailing geological, climatic-landscape, hydrological and thermodynamic conditions. In our opinion, the prevalence of the fresh ground water of different component composition in the Heihe artesian basin is due to the principle factors controlling the hydrogeological development in the Heihe artesian basin. These are geological, climatic and hydrogeological factors, among which the conditions of groundwater recharge are the most important.

Keywords: *groundwater, sources of groundwater formation, arid areas, hydrogeological structure, the Heihe artesian basin, the intermountain basin.*