

Боревский Б.В.¹, Абрамов В.Ю.¹, Ершов Г.Е.¹,
Секерина И.Н.¹, Язвин А.Л.¹, Корошинадзе Т.²
(1 — ЗАО «ГИДЭК», 2 — IDS «BORJOMI GEORGIA»)

**ПРИРОДНАЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
БОРЖОМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ УГЛЕКИСЛЫХ
МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД И ЕЕ ТРАНСФОРМАЦИЯ В
ПРОЦЕССЕ РАЗВЕДКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ**

*В статье рассмотрены основные особенности природной гидрогеологической модели Боржомского месторождения углекислых минеральных вод и ее трансформации под влиянием самоизлива из скважин в процессе разведки и эксплуатации. Геолого-гидрогеологические условия рассмотрены с позиций формирования и оценки приходных и расходных статей баланса месторождения и формирования газохимического состава углекислых вод «Боржоми». Анализируются причины изменения гидродинамического состояния месторождения при постоянстве газохимического состава минеральных вод. Обоснована методика переоценки запасов минеральных вод «Боржоми» при совместном применении гидравлического метода и математического моделирования на базе материалов опытно-промышленной эксплуатации. Рассмотренный подход позволил обосновать прирост запасов минеральной воды «Боржоми» в 1,6 раза. **Ключевые слова:** месторождение углекислых минеральных вод, природная гидрогеологическая модель, приходные и расходные статьи баланса, формирование газохимического состава, переоценка запасов.*

Borevskiy B.V.¹, Abramov V.Yu.¹, Ershov G.E.¹, Sekerina I.N.¹, Yazvin A.L.¹, Koroshinadze T.² (1 — HYDEC, 2 — IDS «BORJOMI GEORGIA»).

**NATURAL HYDROGEOLOGICAL MODEL OF THE
BORJOMI DEPOSIT OF CARBON DIOXIDE MINERAL
WATERS AND ITS TRANSFORMATION IN THE
PROCESS OF EXPLORATION AND EXPLOITATION**

*The article considers the main features of the natural hydrogeological model of the Borjomi deposit of carbon dioxide mineral waters and its throne formation under the influence of self-spill from wells during exploration and operation. Geological and hydrogeological conditions are considered from the point of view of the formation and evaluation of the income and expenditure items of the field balance and the formation of the gas chemical composition of Borjomi carbon dioxide. The causes of changes in the hydrodynamic state of the field with a constant gas-chemical composition of mineral waters are analyzed. The methodology of revaluation of mineral water reserves "Borjomi" is substantiated with the combined use of the hydraulic method and mathematical modeling based on materials of pilot industrial operation. The considered approach made it possible to justify the 1.6-fold increase in the reserves of Borjomi mineral water. **Keywords:** carbon dioxide mineral water deposit, natural hydrogeological model, income and expenditure balance items, formation of gas chemical composition, revaluation of reserves.*

Геолого-гидрогеологические условия и геоструктурный облик Боржомского месторождения углекислых минеральных вод (МУМВ) определяются его приуроченностью к сложнопостроенному срединному блоковому поднятию Аджаро-Триалетской горно-складчатой области. Геолого-структурная основа месторождения представлена чередованием антиклинальных и синклиналиных складок, прорванных многочисленными разрывными нарушениями различного кинематического типа, основные из которых достигают глубинного магматического очага. Схематическая карта границ Боржомского месторождения и геолого-гидрогеологический разрез представлены на рис.1 и 2.

В районе месторождения в земной коре имеется вулканический очаг (очаги), продуцирующий в верхние горизонты фундамента и осадочный чехол восходящий поток газоводяных флюидов, одним из основных компонентов которого является CO₂.

Смешение восходящего потока флюидов с латеральным потоком подземных вод образует боржомскую минеральную воду, локализованную преимущественно в верхнемеловом-нижнепалеоценовом водоносном комплексе и формирующее уникальное Боржомское месторождение. Пути поступления газоводяных флюидов в осадочный чехол служат, прежде всего, Казбекско-Цхинвальский и другие сочлененные с ним поперечные осевые глубинные разломы, заложенные в долине р. Кура, Гуджаретис-Боржомула и их более мелкие притоки, представляющие собой основные морфологические элементы на площади Боржомского месторождения.

О наличии крупного глубинного разлома по долине р. Гуджаретис свидетельствуют ее линейная конфигурация и многочисленные минеральные источники в ее пределах. Можно предположить, что к сочленению этих двух крупных глубинных разломов и приурочено Боржомское месторождение.

Плотностная дифференциация газоводяной смеси приводит к формированию купольной структуры месторождения за счет аномально высоких пластовых давлений и газового фактора на участках поступления потока из магматического очага. Поступление газоводяных флюидов, приводящих к образованию аномальных избыточных напоров при вскрытии скважинами наиболее обводненных зон продуктивного боржомского пласта, обогащенных углекислым газом, определяет гидроинжекционный тип месторождения.

В пределах месторождения наблюдается сочленение трещинно-жильных водоносных зон с трещинно-пластовой водоносной системой верхнемеловых-нижнепалеоценовых карбонатно-глинистых отложений, чем обусловлено формирование в его пределах трех сложнопостроенных куполообразных скоплений минеральных вод и разделение его на автономные Ликанский, Центральный и Вашловани-Квибисский участки, практически гидравлически не связанные между собой и имеющие индивидуальные пути инъекции из единого магматического очага газоводяной смеси по локальным тектоническим нарушениям.

Геолого-гидрогеологические условия района Боржомского месторождения и различные многочисленные гипотезы формирования минеральных вод «Боржоми» широко освещены в многочисленных публикациях (в основном до конца 1980-х годов), основные из которых приведены в данной статье [1–7]. Комплексная характеристика гидрогеологической модели Боржомского месторождения по состоянию изученности на начало 1980-х годов рассмотрена в статье Г.С. Варгяняна и др. [2].

Проведенные в период 2014–2019 гг. исследования ЗАО «ГИДЭК» совместно с «IDS BORJOMI GEORGIA» позволили существенно углубить и расширить результаты предыдущих исследований. С их учетом и развитием сформированы новые представления о природной гидрогеологической модели месторождения и ее трансформации в процессе разведки и эксплуатации, изложенные в настоящей статье.

Основные куполообразные скопления минеральных вод приурочены к антиклинальным складкам на участках их сочленения с глубинными разломами. В частности, Центральный участок, являющийся первопричиной открытия минеральных вод «Боржоми» в связи с наличием на нем минеральных источников, приурочен к своду Боржомской антиклинали.

Вашловани-Квибисский участок приурочен к впервые выделенной Р.Б. Крапивнером (2018 г.) погребенной Квибисской антиклинали в пределах Баратхевской синклинали, к которой ранее относили этот участок.

В феврале 2020 г. М.Ю. Каплан обнаружил на этом участке на острове в р. Кура выходы минеральных вод, сохранившиеся несмотря на интенсивную эксплуатацию участка.

Минеральные воды боржомского типа приурочены к трещинно-пластовому водоносному комплексу. Водовмещающие карбонатные отложения смяты в структурные антиклинальные и синклинали складки, чередование которых сопровождается формированием геодинамических зон сжатия и растяжения, прорванных проводящими и экранирующими активными тектоническими нарушениями, как правило, линейного типа.

Водоносный комплекс верхнемеловых-нижнепалеоценовых отложений перекрыт слабопроницаемой толщей боржомского флиша. Она представлена переслаиванием глин, аргиллитов и песчаников. В зонах повышенной трещиноватости этот комплекс содержит маломинерализованные боржомские воды с минерализацией до 2–4 г/л. Можно полагать, что это разбавленные

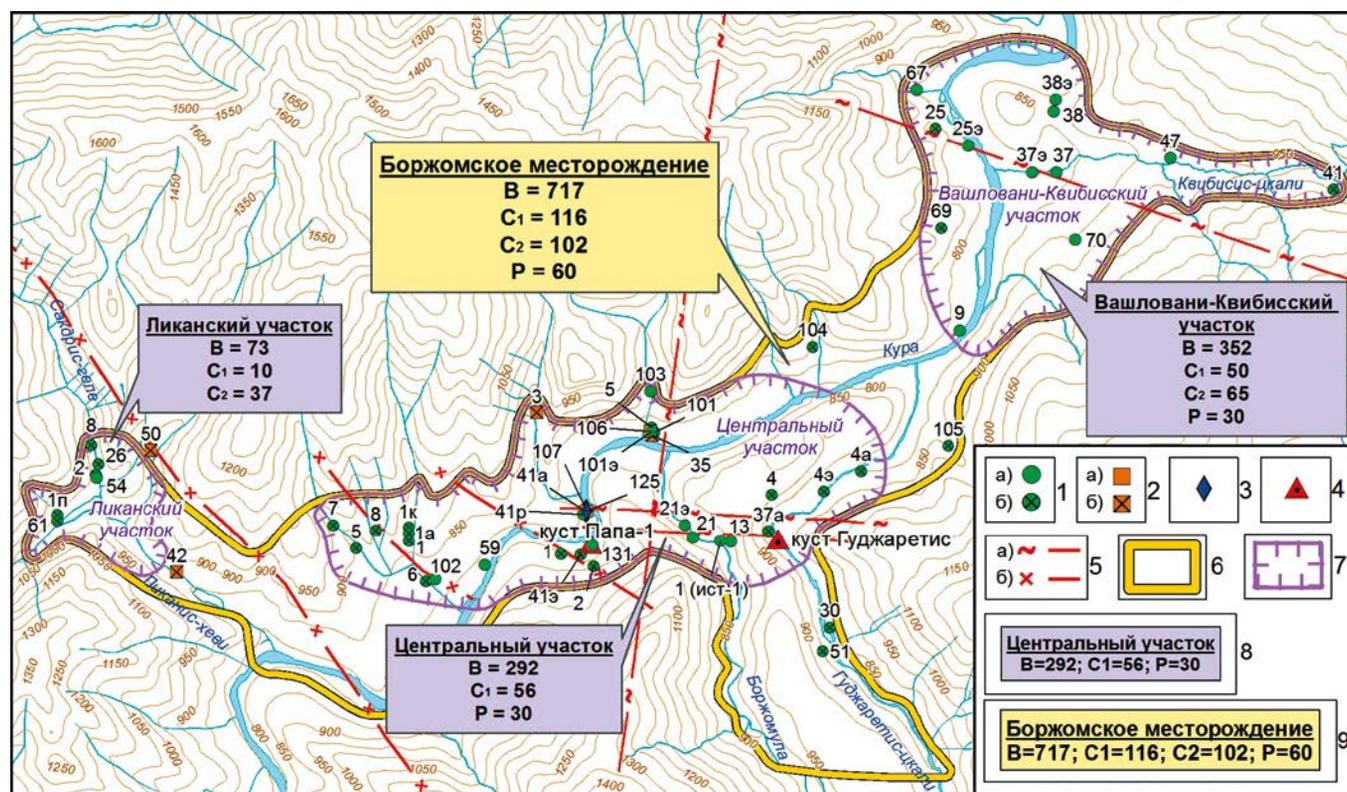


Рис. 1. Схема границ Боржомского месторождения углекислых минеральных вод и его участков: 1 — скважина, оборудованная на комплекс верхнемеловых и нижнепалеоценовых карбонатных отложений: а — в рабочем состоянии, б — ликвидированная; 2 — скважина, оборудованная на комплекс боржомского флиша среднепалеоценовых и нижнеэоценовых отложений: а — в рабочем состоянии, б — ликвидированная; 3 — скважина, оборудованная на водоносный горизонт четвертичных отложений, в рабочем состоянии; 4 — куст скважин; 5 — разлом по кровле водоносного комплекса верхнемеловых и нижнепалеоценовых карбонатных отложений: а — высокопроводящий, б — экранирующий; 6 — граница Боржомского месторождения углекислых минеральных вод; 7 — граница эксплуатационного участка Боржомского месторождения углекислых минеральных вод; 8 — на транспаранте название участка, категория и величина запасов (ресурсов) подземных вод, м³/сут; 9 — на транспаранте название месторождения, категория и величина запасов (ресурсов) подземных вод, м³/сут

современной инфильтрацией боржомские воды с минерализацией 5.5–7.5 г/л (классический Боржом).

Характер складок, углы падения их крыльев, кинематический тип и структурная позиция разрывных нарушений, их интенсивность и направленность определяют степень трещиноватости горных пород, и раскрытость трещин, слагающих основные верхне-меловой-нижнепалеоценовый (боржомский пласт) и среднепалеоценовый-нижнеэоценовый (боржомский флиш) водоносные комплексы, а также их проницаемость. С тектонической структурой связана крайне высокая неоднородность фильтрационных свойств основных водоносных комплексов, развитых в пределах Боржомского месторождения. Удельные дебиты скважин основного верхнемелового-нижнепалеоценового водоносного комплекса (боржомский пласт) меняются на 2 порядка, составляя десятки, сотые и тысячные доли л/с. Соответственно изменяется величина коэффициента фильтрации (проницаемости) от сотых до нескольких м/сут. Их величины определяются раскрытием трещин, наличием и характером заполнителя. В керне буровых скважин отмечается большое количество трещин, полностью заполненных вторичным кальцитом. На площади месторождения буровыми скважинами боржомский пласт полностью не вскрыт и его мощность, определяемая по аналогии с соседними районами, составляет более 1000 м. Фильтрационные свойства водовмещающих пород в пределах месторождения определяются главным образом их позицией в его складчатой структуре.

В разрезе антиклиналей в верхней части пласта проницаемость пород максимальна на своде и уменьшается вниз по разрезу и по падению пластов. В нижней части толщи она минимальна, улучшаясь вверх по разрезу и восстанию пластов. В синклиналях, наоборот, проницаемость пород максимальна в нижней части складки, уменьшаясь вверх по разрезу и восстанию пластов.

Чередование зон растяжения и сжатия в синклиналях и антиклиналях в разных частях разреза обусловило практическое отсутствие гидравлической связи между участками Боржомского месторождения в связи с тем, что зоны повышенной и пониженной проницаемости в Боржомской, Квибисской и Ломисмтинской антиклиналях и разделяющих их Баратхевской и Рвельской синклиналях непосредственно сочленяются между собой. Проводящие разломы, являясь нарушениями сплошности горных пород, играют роль локальных проводников, экранирующие — фильтрационных барьеров.

Один и тот же разлом может быть anomalно высоким проводником в продольном направлении и экранирующим фильтрационным барьером в поперечном. Ликанский, Квибисский и Занавский разломы служат гидравлическими границами между отдельными блоками водовмещающих пород в пределах месторождения. Складчатая структура месторождения, определившая чередование зон сжатия и растяжения в антиклиналях и синклиналях, также обуславливает отсутствие или весьма слабую гидравлическую связь между отдельными участками.

Таким образом, Центральный участок отделен от Ликанского Ликанским экранирующим разломом, а от Вашловани-Квибисского осевой частью Братхев-

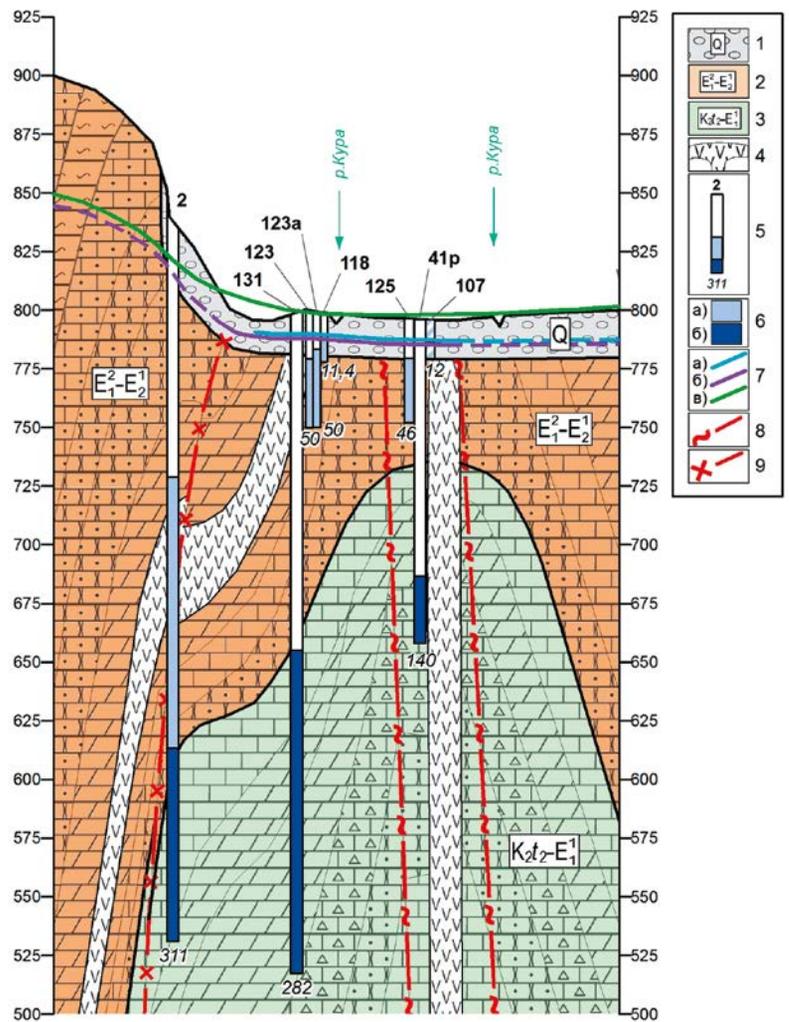


Рис. 2. Схематический геолого-гидрогеологический разрез Боржомского месторождения: 1 — водоносный горизонт четвертичных отложений; 2 — водоносный комплекс боржомского флиша среднепалеоценовых и нижнеэоценовых отложений; 3 — водоносный комплекс верхнемеловых и нижнепалеоценовых карбонатных отложений; 4 — дайки и силлы диабазов; 5 — скважина, сверху ее номер, внизу глубина (м), закрапка опробованного интервала соответствует химическому составу воды; 6 — химический состав воды в опробованном интервале: а — гидрокарбонатные воды с минерализацией 2–5 г/л, б — гидрокарбонатные воды с минерализацией 5–7,5 г/л; 7 — уровень подземных вод: а — водоносного горизонта четвертичных образований, б — водоносного комплекса боржомского флиша, в — водоносного комплекса нижнего палеоцена-верхнего мела; 8 — высокопроводящий разлом; 9 — экранирующий разлом

ской синклинали, что является геолого-структурным обоснованием отсутствия между ними гидравлической взаимосвязи.

Естественной северной границей Вашловани-Квибисского участка является осевая часть Рвельской синклинали, отделяющая его от Занавского месторождения углекислых минеральных вод, приуроченного к Ломисмтинской антиклинали.

В пределах каждого из участков месторождения наиболее перспективными для получения промышленных притоков боржомской минеральной воды являются сводовые части Боржомской, Квибисской и Ломисмтинской антиклиналей. Это четко подтверждается соотношением величин водопритоков, полученных из пробуренных скважин на разных участках месторождения и подтвердивших отчетливую связь их продуктивности с тектонической структурой.

Гидравлическая связь между отдельными участками, приуроченными к сводовым частям антиклиналей, существенно затруднена или практически отсутствует. В пределах каждой антиклинали гидравлическая связь между отдельными скважинами весьма существенна, особенно в направлении по простиранию оси складки. Она может распространяться на значительные расстояния, что имеет место в своде Боржомской антиклинали. Естественным препятствием фильтрационному потоку служат пересекающие антиклинали, экранирующие разломы, каким, например, является Ликанский сбросо-сдвиг.

Глубинными гидротермодинамическими и гидрогеохимическими исследованиями, выполненными при разведочных работах в 1978–1982 гг., установлено, что участки локализации боржомской минеральной воды имеют сложную морфологию. Ее основным коллектором является верхний мел-нижний палеоцен, в котором фиксируются три не связанных между собой гидродинамических купола напоров, сформировавшихся над автономными очагами поступления глубинных газодводящих флюидов [2]. Глубинные питающие потоки четко фиксируются по аномалиям гидрогазохимического, геотермического и гидродинамического полей.

Газогидрохимические гидродинамические купола напоров имеют сложную пространственную форму, обусловленную соотношением приходных и расходных статей баланса газодводящей смеси, проницаемостью водовмещающих пород, раскрытостью антиклинальных структур, сетью приуроченных к ним разломов и вторичных складок, экранирующими свойствами отложений, перекрывающих верхнемеловой-нижнепалеоценовый комплекс, и его внутренней неоднородностью. Они сформировались в течение длительного геологического времени, хотя, безусловно, являются гидродинамически весьма подвижными, а их границы носят условный характер.

В результате анализа большого фактического материала, режима эксплуатации за период с 1932 г., отчетных материалов, обширной литературы и проведенных научных и полевых исследований, авторами сделан вывод о том, что газохимический состав боржомской

минеральной воды формируется непосредственно в верхнемеловом-нижнепалеоценовом водоносном комплексе при смешении латерального потока метеогенных вод, получающих инфильтрационное питание высоко в горах, и глубинного газодводящего потока магмогенных вод (обогащенных CO_2 и различными микрокомпонентами) за счет катионного обмена с морским поглощенным комплексом водовмещающих пород. В совокупности эти процессы определяют гидрокарбонатно-натриевый состав, величину минерализации и газовый фактор боржомской минеральной воды. Количественное соотношение величины этих двух потоков играет определяющую роль в формировании запасов минеральных вод.

В статье Г.С. Вартаняна и др. [2] гипотеза о формировании боржомской минеральной воды сформулирована следующим образом: «Эксплуатационные запасы боржомской минеральной воды определяются ресурсами глубинных углекислых флюидов и маломинерализованных вод водоносного комплекса нижнего палеоцена-верхнего мела».

Доля глубинной составляющей по данным одних исследователей (Д.М. Габегава) оценивается в 40 %, других — 90 % (В.А. Поляков).

Гипотеза авторов настоящей статьи разъясняет понятие глубинные углекислые флюиды с позиций фазового состояния H_2O , CO_2 , включая их сверхкритические флюиды (СКФ H_2O и CO_2) с последовательным, по мере подъема к поверхности Земли, взаимодействием воды и углекислого газа. До критической точки CO_2 ($T = 31^\circ\text{C}$, $P = 7.3 \text{ Мпа}$) — это две не смешивающиеся разные по плотности жидкости, не реагирующие друг с другом СКФ и CO_2 накапливаются в водоносных горизонтах и образуют самостоятельные залежи, как нефть. После критической точки CO_2 реагирует с водой и образуется водный раствор угольной кислоты ($\text{pH} = 4.0$), который нейтрализуется минералами горных пород вследствие их гидролиза с образованием гидрокарбоната натрия; при уменьшении пластового давления и, как следствие, уменьшения растворимости CO_2 в воде образуется спонтанная фаза CO_2 .

Сверхкритические условия — это физическое состояние вещества выше критической точки, где исчезает различие между газом и жидкостью. В физическом представлении — это газ капле или газ, сжатый до плотности жидкости. СКФ CO_2 — неполярный растворитель, как гексан, экстрагирует только неполярные органические вещества.

Боржомские минеральные воды формируются за счет смешения метеогенных инфильтрационных вод, сформировавшихся высоко в горах на отметках около 2200–2500 м (по данным изотопных определений дейтерия и кислорода-18 — много тысячелетий назад) и поступающих в пределы месторождения с латеральным потоком, и сверхкритического газожидкостного флюида (газо-водяная смесь — физическая смесь не смешивающихся друг с другом СКФ H_2O , CO_2 , HCl) термометаморфического генезиса, поступающего из магматического очага в кристаллическом фундаменте

по тектоническим разломам, затрагивающим полностью или частично мезокайнозойскую толщу, активными в современную геологическую эпоху.

Изменение химического состава глубинной составляющей минеральных подземных вод, находящихся в сверхкритическом состоянии, происходит ступенчато в соответствии с критическими точками сверхкритических флюидов H_2O , CO_2 , HCl , вследствие уменьшения давления и температуры ниже критических параметров при их подъеме к областям разгрузки у поверхности Земли. В критических точках происходит химическое взаимодействие сверхкритических флюидов с молекулами воды с образованием истинных водных растворов кислот, которые нейтрализуются горными породами, обогащая воду минеральными солями. Этим объясня-

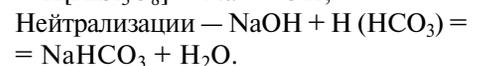
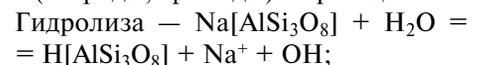
ется факт вскрытия многими скважинами глубиной до 1500 м на глубине более 900–1000 м боржомской воды с минерализацией менее 3 г/л ниже зоны классического боржоми с минерализацией 6–7 г/л.

Глубинная составляющая и является так называемой «коренной струей», определяющей формирование термогазохимического состава минеральных вод путем углекислотного «выщелачивания» (нейтрализация угольной кислоты) солевого и ионно-обменного комплекса водовмещающих пород и диффузии поровых седиментационных вод морского генезиса в среде с двойной емкостью (трещиновато-пористые горные породы).

Схема формирования минеральной воды «Боржоми», разработанная авторами, приведена на рис. 3 и может интерпретироваться следующим образом. Глубинный и латеральный потоки, смешиваясь эжекционным путем в боржомском пласте (пласт-реципиент), в окончательном виде формируют в верхнемеловом-нижнепалеоценовом водоносном комплексе боржомскую минеральную воду путем углекислотного выщелачивания (нейтрализация угольной кислоты натриевым обменным комплексом морских глинистых отложений) солевого и обменного комплекса карбонатных водовмещающих пород, углекислотной нейтрализации продуктов гидролиза натриевых алюмосиликатов вулканитов по приведенной на рис. 3 схеме:

1. Нейтрализация угольной кислоты натриевым обменным комплексом (ионный обмен ионов водорода на обменный натрий горных пород) морских глинистых отложений с образованием соды.

2. Нейтрализация продуктов гидролиза натриевых алюмосиликатов типа альбит-вулканитов с образованием соды и диффузии поровых растворов морского генезиса (хлориды, бромиды) по реакциям:



3. Нейтрализация угольной кислоты карбонатом кальция карбонатных пород (известняки, мергели) с последующим ионным обменом растворенного в воде кальция на натрий обменного комплекса морских глинистых отложений с образованием соды.

Зона формирования боржомских минеральных вод по глубине — зона образования угольной кислоты ($\text{pH} = 4.01$) — продукта взаимодействия CO_2 и H_2O и ее нейтрализация горными породами. Из углекислого газа образуются гидрокарбонаты. Источником натрия минеральных вод «Боржоми» являются натриевые

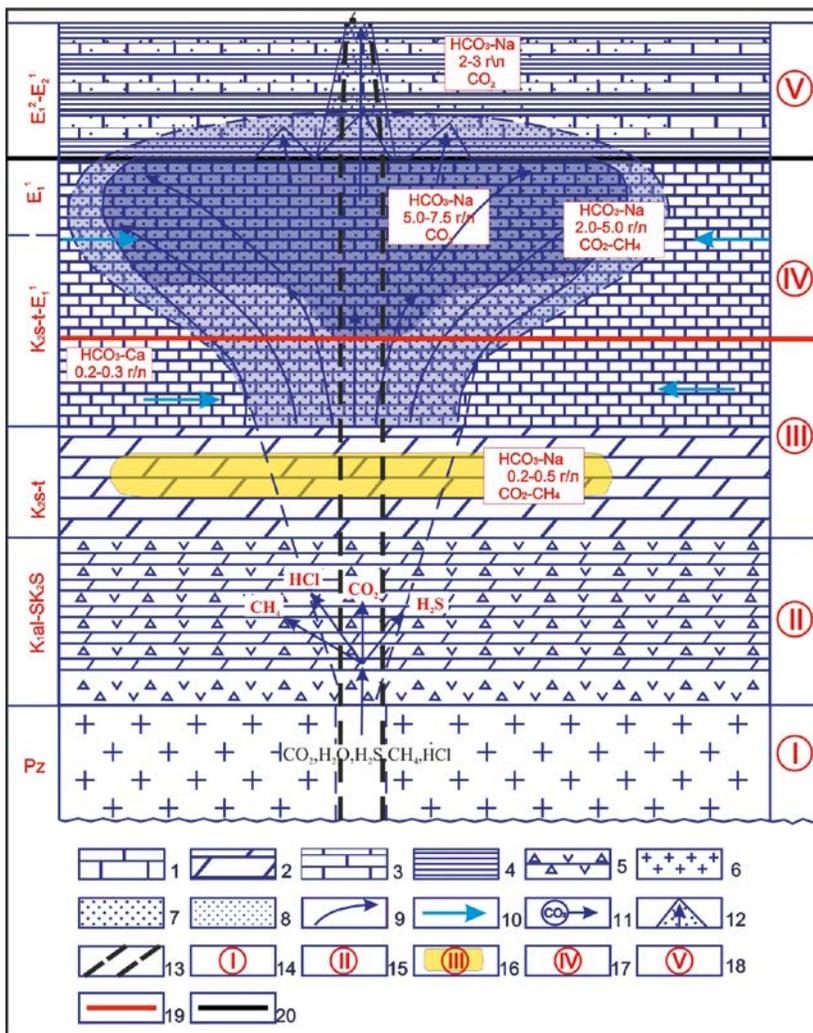


Рис. 3. Принципиальная гидродинамическая схема формирования купола минеральных вод: 1 — известняк; 2 — мергель; 3 — песчаник; 4 — глина; 5 — вулканогенно-осадочные породы; 6 — кристаллические сланцы; 7 — вода «Боржоми» ($M=0,5-7,5$ г/л); 8 — HCO_3-Na ($M=2-5,0$ г/л); 9 — линии инъекции; 10 — метеогенные воды; 11 — инъекция магматических кислых газов (CO_2 , H_2S , HCl); 12 — инъекция спонтанной CO_2 ; 13 — тектонический разлом; 14 — сверхкритический флюид (CO_2 , H_2O , H_2S , CH_4 , HCl); 15 — сверхкритический флюид CO_2 , HCl , H_2S ; 16 — предполагаемая залежь сверхкритического флюида CO_2 , CH_4 ; 17 — зона Боржоми; 18 — зона дегазации CO_2 Боржоми; 19 — критическая линия сверхкритического флюида (CO_2) $T^C=31$, $P_{bar}=73$; 20 — линия раздела фаз CO_2 (раствор) \rightarrow CO_2 спонтанный газ

Таблица 1
Баланс боржомского пласта по участкам месторождения

Участок месторождения	Составляющие баланса, м³/сут				Всего
	Приток к участку +	Разгрузка вверх –	Приток снизу+ (в % от водоотбора)	Водоотбор скважинный	
Центральный	+384.3	-106.3	+70 (20 %)	-348	0
Вашловани-Квибисский	+540.8	-145.7	+70 (15 %)	-465.5	-0.4
Ликанский	+104.3	-4.4	+20 (17 %)	-120	-0.1

Таблица 2
Баланс боржомского пласта по Центральному участку при факторно-диапазонном анализе притока снизу

Составляющие баланса, м³/сут				
Приток участку+	Разгрузка вверх-	Приток снизу+ (в % от водоотбора)	Водоотбор скважинный	Всего
+285.2	-108.3	+146 (45 %)	-323	-0.1
+216.4	-112.9	+219 (68 %)	-323	-0.5

алюмосиликаты терригенно-карбонатных верхнемеловых-нижнепалеоценовых горных пород и их натриевый морской поглощенный (ионно-обменный) комплекс. Ниже этой зоны (ниже изобаты 73 атм. и изотермы выше 31 °С) CO₂ находится в сверхкритическом состоянии, он не взаимодействует с водой и, как следствие, не образуется боржомская вода. Этим процессом объясняется также уменьшение минерализации боржомских вод с глубиной по ступенчатой схеме или, корректнее, — увеличение минерализации по мере перехода глубинного потока газовой смеси через критическую точку.

Разгрузка боржомской минеральной воды в естественных условиях осуществлялась минеральными источниками №№ 1 и 2 в Парке на Центральном участке, наблюдаемыми визуально участками восходящей разгрузки в руслах рек Кура, Боржомула и Гуджаретис-цкали. Эта разгрузка на Центральном участке оценивалась различными исследователями от 500 м³/сут (А.М. Овчинников) до 800 м³/сут (Г.М. Гаглоев).

Можно полагать, что существенную роль имела «скрытая» разгрузка в поймах рек и других элементах рельефа с избыточными напорами над поверхностью земли (пластовое высачивание, испарение и др.).

Количественная оценка приходных и расходных статей баланса впервые была выполнена ЗАО «ГИДЭК» методом математического моделирования при переоценке запасов Боржомского месторождения в 2018 г. Баланс Боржомского месторождения был оценен по каждому из его участков на геофильтрационной модели, откалиброванной по данным ретроспективного периода эксплуатации. Результаты оценки приведены в табл. 1.

Однако при продолжении наблюдений в 2018–2019 гг. натурное снижение уровней оказывалось больше модельного как по абсолютной величине, так и по темпу снижения. Поэтому была выполнена корректировка доли глубинной составляющей на Центральном участке. Были выполнены дополнительные варианты с заданием величины глубинного потока от 146 до 219 м³/сут или от 45 до 68 % от суммарной величины приходных статей баланса (табл. 2). Наилучшая сходимость динамики напоров (уровней) на модели с натурой была получена при величине около 45 % от суммарной величины приходных статей баланса (рис. 4).

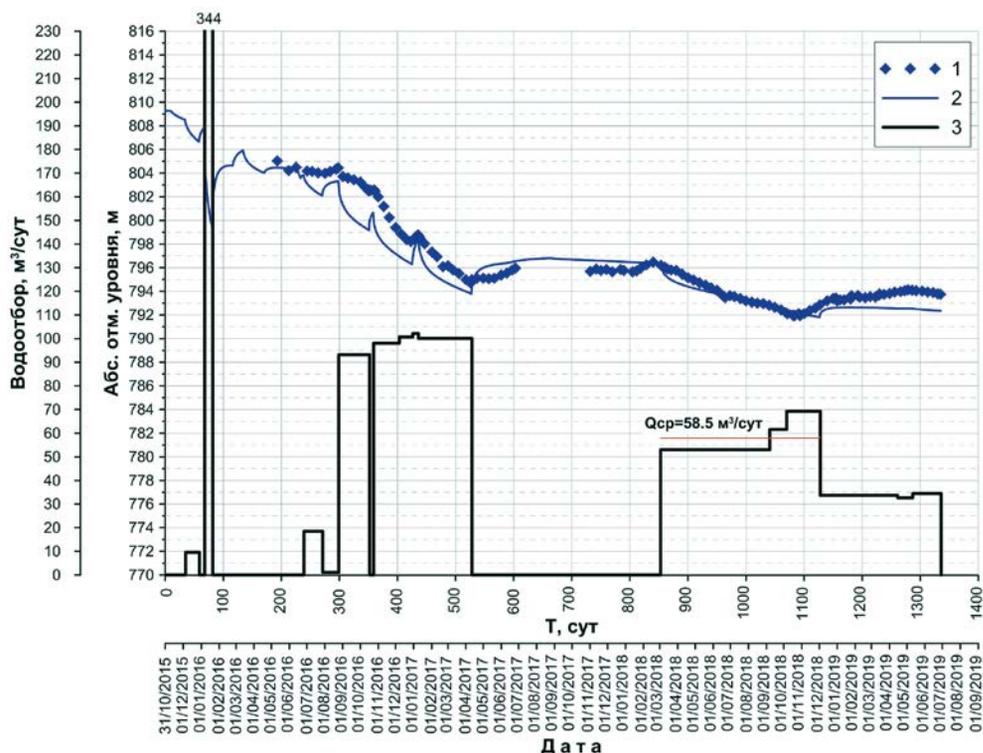


Рис. 4. Сопоставление натуральных и расчетных уровней по скв. 131 с 2015 по 2019 г.: 1 — фактический уровень, м; 2 — расчетный уровень, м; 3 — водоотбор, заданный на модели по скв. 131, м³/сут

Естественно, что эта величина может изменяться в периоды землетрясений. Естественное природное состояние куполов минеральных вод месторождения было существенно изменено в процессе многолетнего неуправляемого самоизлива при бурении скважин и последующей интенсивной эксплуатации. Прежде всего произошло перераспределение путей разгрузки минеральных вод за счет самоизлива из буровых скважин. Очевидными свидетельствами таких изменений было быстрое снижение напоров подземных вод, отмеченных при вскрытии пласта, и расходов самоизливающих скважин вплоть до прекращения самоизлива, исчезновение источников в Парке, сокращение участков восходящей разгрузки.

Однако, несмотря на интенсивную эксплуатацию месторождения в течение 90 лет, разгрузка в речную сеть продолжается и в настоящее время. Сохранились газовые и температурные аномалии различного характера, выявляемые при акваториальных гидрохимических и температурных исследованиях и газовой съемке, что свидетельствует о том, что отбор воды из скважин даже в периоды интенсивной эксплуатации не привел к истощению запасов месторождения. Существенным подтверждением этого вывода является не только закартированный и наблюдаемый в пойме р. Кура на Центральном участке минеральный источник, но и открытый уже в 2020 г. новый минеральный источник на острове в русле р. Кура на Вашловини-Квибисском участке. Предельная величина отбора подземных вод может достигать суммарной величины перехвата естественной разгрузки.

Имеющийся фактический материал позволяет предполагать, что поступающая из магматических очагов газодояная смесь расходовалась в естественных условиях различными путями разгрузки не полностью. Частично ее накопление происходило в локальных экранированных ловушках, о чем свидетельствуют аномально высокие напоры, высокие начальные газовый фактор и дебиты скважин при вскрытии ими наиболее продуктивных интервалов разреза боржомского пласта. В сложнопостроенных экранированных куполах в течение длительного геологического времени медленно накапливались упругие запасы газодояной смеси, быстро израсходованной при вскрытии этих куполов буровыми скважинами.

На достаточно быстрое снижение расходов самоизлива из скважин, избыточных напоров и газового фактора обращали внимание многие исследователи, начиная с 1930-х годов (А.М. Овчинников), и особенно в период интенсивного ведения буровых работ (Г.М. Гаглов). Основные предполагаемые факторы, определяющие медленное накопление и быстрое расходование газодояной смеси, сводятся к следующему.

Первоначальные напоры при прекращении самоизлива из скважин или резком снижении водоотбора никогда не восстанавливались до первоначальных или близких к ним величин. Аналогичная картина наблюдалась на Нагутском месторождении углекислых минеральных вод на Северном Кавказе.

Хорошей иллюстрацией такого характера восстановления является различное соотношение абсолютных отметок напоров в скважинах на Центральном участке до и после форсированного водоотбора в конце 2016 — начале 2017 гг.

В связи с интенсивным снижением напоров и расходов скважин при самоизливе, особенно интенсивном при вскрытии скважинами интервалов разреза с аномально высокими газовым фактором, напорами и расходами, многие исследователи делали вывод об истощении накопленных естественных запасов минеральных вод Боржомского месторождения, что приводило к постоянному снижению оцененных эксплуатационных запасов минеральных вод при каждой последующей их оценке. Сторонники гипотезы истощения придерживались в основном теории седиментационного формирования боржомских минеральных вод или, во всяком случае, их важной составляющей роли в величине эксплуатационных запасов Боржомского месторождения, в т.ч. за счет поступления из нижнемелового горизонта и расходования накопленных запасов при эксплуатации. Однако это опасение разделяли не все специалисты. В частности, этот вопрос рассмотрен в отчете Г.М. Гаглоева (1962). Авторы отчета делают следующий весьма важный вывод: «Как известно, при вскрытии артезианских вод и снятии напора путем выпуска воды с течением времени образуется депрессия пьезометрической поверхности. Размеры депрессии постепенно возрастают в зависимости от времени, а затем при установившемся движении стабилизируются. В этот начальный период скважина дает воду за счет упругих запасов. На сработку упругих запасов может потребоваться длительное время, в продолжении которого дебит непрерывно должен падать!» (Подчеркнуто авторами статьи).

Этот вывод авторов отчета, сделанный в 1962 г., подтвердился при всестороннем анализе многолетнего периода эксплуатации. Можно только отметить, что при поддержании стабильного дебита при насосной эксплуатации или регулировании величины самоизлива снижение расхода сменяется снижением напора, а затем достижением равенства притока и оттока. Постепенно наступает стабилизация при достижении равенства приходных и расходных статей баланса. При каждом увеличении водоотбора это равновесие нарушается. Модель формирования автономного купола боржомской минеральной воды на любом участке месторождения и его трансформация в процессе эксплуатации может происходить следующим образом.

В экранирующую ловушку происходит приток газодояной смеси, превышающий ее расходование. Это различие имеет небольшую величину, но накопление газодояной смеси происходит в течение весьма длительного геологического времени, не менее тысячелетий, возможно десятков тысяч лет (во всяком случае нулевое содержание трития и радиоуглерода свидетельствуют об этом).

При вскрытии газодояной ловушки с аномально высокими напорами скважина изливается с очень

большим расходом и газовым фактором. Поэтому накопленный за длительный период избыточный объем газовой смеси расходуется за несколько лет или даже несколько месяцев. После этого устанавливается или должно установиться новое равновесие притока и расходование минеральной воды в скважине или

на участке в целом, но при значительно более низких избыточных напорах. Время установления такого равновесия может достигать многих лет и водоотбор в этот период будет происходить при неустановившемся режиме. Прогнозное математическое моделирование, выполненное авторами, подтвердило это предположение.

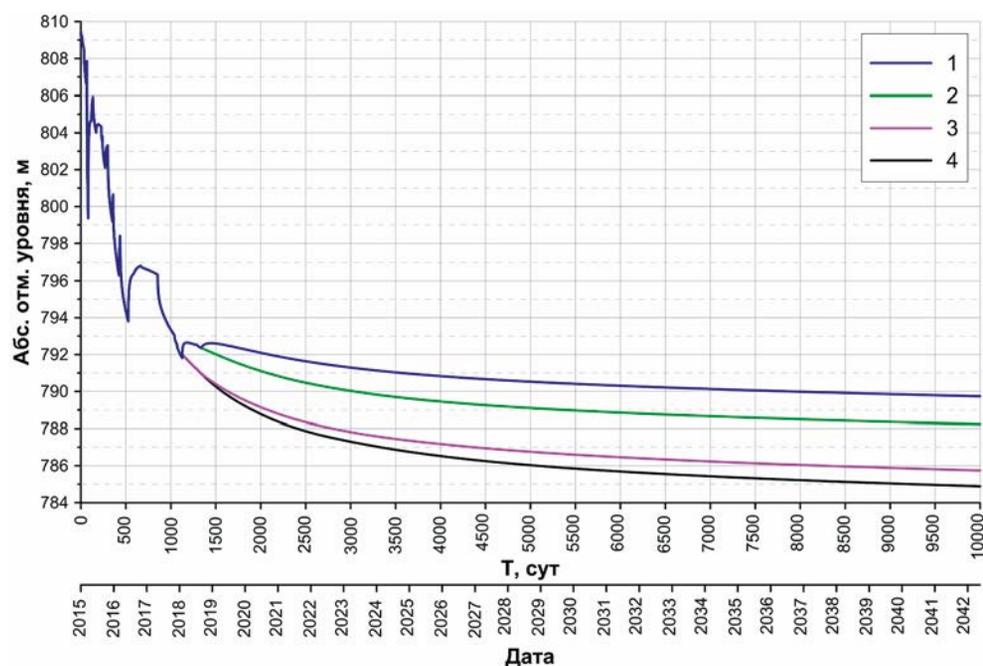


Рис. 5. Сопоставление прогнозных уровней по вариантам по скв. 131 на 25 лет: 1 — вариант 1, водоотбор 292 м³/сут, в т.ч. по скв. 131 — 34 м³/сут; 2 — вариант 2, водоотбор 322 м³/сут, в т.ч. по скв. 131 — 34 м³/сут; 3 — вариант 3, водоотбор 348 м³/сут, в т.ч. по скв. 131 — 60 м³/сут; 4 — вариант 4, водоотбор 378 м³/сут, в т.ч. по скв. 131 — 60 м³/сут

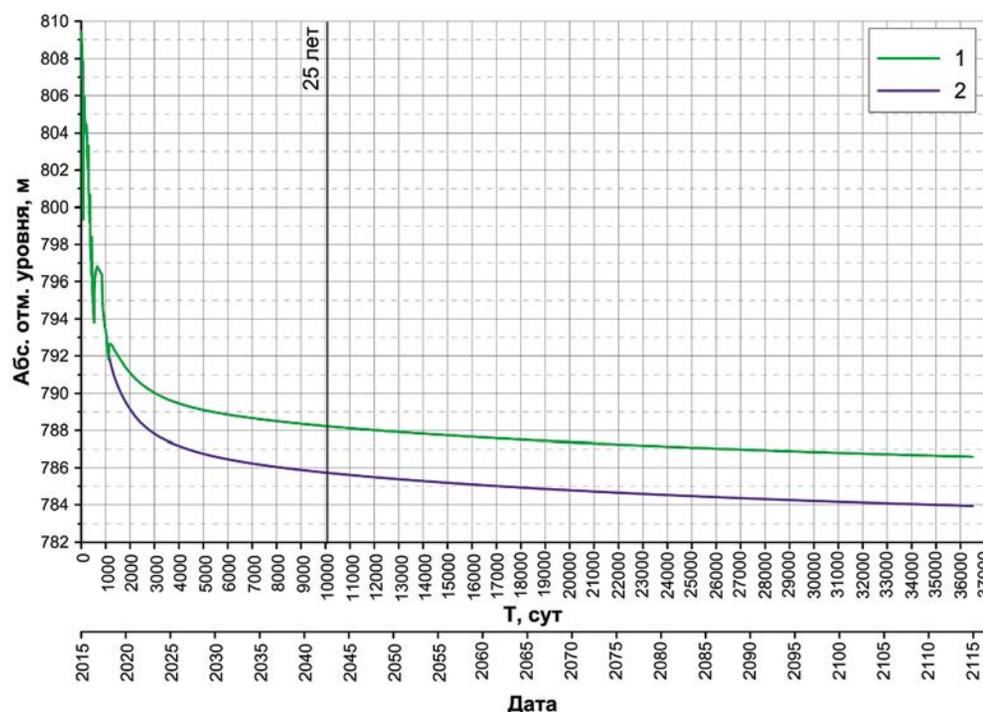


Рис. 6. Прогнозный уровень на 100 лет по скважине 131: 1 — вариант 2, водоотбор 322 м³/сут, в т.ч. по скв. 131 — 34 м³/сут; 2 — вариант 3, водоотбор 348 м³/сут, в т.ч. по скв. 131 — 60 м³/сут

На рис. 5 и 6 показан характер снижения напоров при дополнительной нагрузке на срок 25 и 100 лет. Как видно, в данном варианте прироста водоотбора к ранее достигнутой стабилизации напоров (уровней) не происходит не только в течение 25, но и даже 100 лет.

При этом дополнительное снижение уровня за столь длительный период (75 лет) не превышает 2 м (рис. 6), что можно признать несущественным. Аналогичная величина снижения отмечается с 5 по 25 год эксплуатации.

При крайне низких коэффициентах фильтрации и пьезопроводности процесс формирования воронки депрессии происходит крайне медленно. Поэтому для достижения нового равновесия между приходными и расходными статьями баланса требуется весьма длительное время, после которого можно ожидать наступления стабилизации.

Непрерывное изменение величины водоотбора в ретроспективный период эксплуатации обуславливало преимущественно нестационарный режим фильтрации и затрудняло достижение стабилизации режима минеральных вод.

Макет такой системы аналогичен надутой воздушной резиновой камере, которая требует некоторой постоянной подкачки для поддержания постоянного внутреннего давления. При этом давление будет сохраняться, если объем подкачки равен объему расхо-

дования воздуха путем его диффундирования через резиновую оболочку или возрастая при превышении поступления. Но если проткнуть камеру гвоздем, то давление быстро упадет и уже не восстановится при прежних объемах подкачки и диффузионного рассеивания за какое-нибудь реально обозримое время.

Эта гипотеза полностью подтвердилась при бурении скв. №131 на участке Папа-1. В 1955 г. на этом участке были пробурены скв. №№ 1 и 2, через которые был сброшен упругий объем газовой смеси при снятии начального избыточного напора, составляющий 60 м и расходе более 1000 м³/сут. При бурении скв. № 131 в 2015 г. отмечалось бурное выделение газа СО₂ (рабочие бурили в респираторах). После сброса в течение 14 суток среднего расхода около 350 м³/сут избыточный напор составил всего 10 м. При этом при вскрытии наиболее раздробленного интервала пород расход самоизлива в течение нескольких часов достигал 1360 м³/сут при бурном выделении СО₂. Сведения о расходе скв. № 1 при вскрытии пласта отсутствуют. В дальнейшем при отборе из скв. № 131 — 100 м³/сут наблюдался резко выраженный неустановившийся режим.

Приведенные данные позволяют сделать вывод о том, что за 60 лет простоя скважин на участке накопился неизрасходованный избыток газовой смеси в значительно меньшем объеме, чем до бурения скв. № 1. Замеренный напор оказался не менее, чем в 10 раз ниже, т.е. накопление газовой смеси до бурения скв. № 1 продолжалось не менее, чем 1000 лет. Большая величина газового фактора также отмечалась Г.М. Гаглоевым при бурении скважин в зонах аномально высоких напоров в 1950–1960-х годах.

Таким образом, после сброса газовой купола с низкой плотностью за счет высокого газового фактора для стабилизации режима уровней и расходов при максимально допустимом водоотборе должно быть достигнуто новое равновесие при большей глубине и размерах воронки депрессии.

В период опытно-промышленной эксплуатации 2015–2019 гг. такой максимально допустимый водоотбор и соответствующее ему равновесие достигнуто не было, о чем свидетельствуют неустановившийся режим фильтрации при суммарном водоотборе, сохранившаяся при этом разгрузка в русле р. Кура и функционирующий источник минеральной воды на ее пойме. В связи с этими факторами можно полагать, что резервы повышения водоотбора на Центральном участке пока не исчерпаны. Аналогичная ситуация может быть и на Вашловани-Квибисском участке после открытия там существующего минерального источника.

По данным глубинных гидротермодинамических и гидрохимических зондирований, выполненных в 1981–1982 гг., был определен объем купола пород, содержащих боржомскую воду с минерализацией выше 5 г/л. По данным выполненных послойных расчетов максимальная величина купола на Центральном участке была оценена величиной 3.6 км³, а на Вашловани-Квибисском — 0.55 км³ [1].

Среднее значение активной пористости может быть принято 0.2 %, что соответствует трещинной емкости водовмещающих пород (поскольку время эксплуатации месторождения недостаточно для значимого диффузионного водообмена в системе «матрица породы — трещина»). Тогда объем воды с минерализацией более 5 г/л, содержащейся в этих куполах, составит соответственно около 7.2 и 1.1 млн м³/сут.

По имеющимся данным за период с 1934 по 2015 г. суммарный отбор боржомской минеральной воды с минерализацией более 5 г/л на Центральном участке составил 6.4 млн м³, а на Вашловани-Квибисском — 9.4 млн м³, т.е. отбор воды на Центральном участке близок к ее объему в куполе, а на Вашловани-Квибисском превышает его в 10 раз. Если учесть возможные ошибки в определении объемов куполов пород, содержащих добываемую минеральную воду, необходимо сделать вывод, что сработка и истощение запасов боржомской воды отсутствуют, поскольку изменения качества воды за счет подтока некондиционных вод не наблюдается. Отметим, что подсчитанная величина суммарного объема водоотбора не учитывает значительный излив при бурении скважин и в первые периоды до их обустройства устьевым оборудованием в течение многих лет.

Авторами настоящей статьи принята гипотеза формирования боржомской минеральной воды непосредственно в боржомском пласте за счет катионного обмена и нейтрализации угольной кислоты, поступающей в пласт-рецепиент с глубинным потоком газовой смеси из магматического очага.

Процесс формирования боржомской минеральной воды происходит в течение времени, достаточном для насыщения смеси метеогенных и магматогенных вод катионами натрия. Солевой ресурс водовмещающих пород по сравнению с его расходом можно считать неисчерпаемым. Помимо солевого комплекса пород и самого растворителя необходимой составляющей ресурсного потенциала является ресурс углекислого газа СО₂.

Изложенное позволяет сделать вывод, что для обоснования предельной величины ресурсов боржомской минеральной воды необходимо оценить суммарную величину растворителя, т.е. приходных статей баланса, складывающихся из величины латерального потока подземных вод из-за пределов Боржомского месторождения и восходящего глубинного потока магматогенных вод в естественных условиях, и в процессе опытно-промышленной эксплуатации месторождения, а также потока углекислого газа, в т.ч. его часть, расходуемую на формирование боржомской минеральной воды в объеме водоотбора и на «выброс» в атмосферу.

Поскольку естественная разгрузка минеральных вод и ресурсы СО₂ пока не исчерпаны, можно судить о возможности наращивания эксплуатационных запасов минеральных вод.

Рассмотренная природная модель Боржомского месторождения и ее трансформация в процессе разведки и эксплуатации показывает, что для оценки

Таблица 3
Сопоставление эксплуатационных запасов, оцененных в 2018 г., с ранее утвержденными

Участок	Запасы подземных вод (по кат. А+В+С ₁ +С ₂), м ³ /сут		
	стоят на учете	результаты оценки 2018 г.	прирост
Центральный	185	348	163
Вашловани-Квибисский	303	467	164
Ликанский	73	120	47
Итого	561	935	374

потенциальной величины ресурсов боржомской минеральной воды и эксплуатационных запасов необходимо рассчитать величину приходных и расходных статей баланса в естественных и нарушенных условиях при различной величине водоотбора, глубине и размерах воронки депрессии. Гидравлический метод подсчета запасов, применявшийся на протяжении многих десятилетий, не позволяет решить эту задачу. С этой целью наряду с гидравлическим методом для подсчета запасов углекислых минеральных вод Боржомского месторождения в 2018 г. впервые применен метод численного математического моделирования [1]. Конечно, столь сложная природная гидрогеологическая модель может быть преобразована в численную математическую в приближенном варианте. Однако другого метода расчета баланса подземных вод и прогнозирования его изменений в настоящее время не существует.

В заключение еще раз отметим, что образовавшиеся в результате процесса гидроинжекции купола с аномально высокими напорами минеральных вод формировались в течение длительного геологического времени, исчисляемого тысячелетиями. Они были сработаны в течение первых нескольких лет после вскрытия скважинами. Естественно, что они не могут быть восстановлены даже за несколько лет или десятилетий после сокращения или даже прекращения водоотбора. Поэтому, все прогнозные расчеты должны выполняться от уровней, сформированных за ретроспективный период эксплуатации, включая период опытно-промышленной эксплуатации 2015–2018 гг.

Предельная величина ресурсов боржомской минеральной воды, формирующейся в верхнемеловом-нижнепалеоценовом водоносном комплексе, лимитируется, прежде всего, ресурсами углекислого газа, поступающего из магматического очага. Его средне-многолетняя величина может рассматриваться как константа. Поэтому основным вопросом является оценка предельной величины концентрации CO₂, при которой формируется боржомская вода (в данном контексте) с минерализацией более 5 г/л. По мнению авторов такая вода формируется при газовом факторе около 0.5 на Вашловани-Квибисском участке. Эта величина в настоящее время может быть принята предельной при проведении прогнозных расчетов.

Второй составляющей, лимитирующей потенциальные ресурсы минеральных вод Боржомского месторождения, является расход растворителя, поступающего из магматического очага. Его величина является наименее достоверной при балансовых расчетах методами численного моделирования, существенно влияет на время стабилизации режима минеральных вод и требует уточнения по мере накопления новых данных о режиме эксплуатации на разных ступенях эксплуатации и их воспроизведении на математической модели.

На базе, разработанной авторами природной гидрогеологической модели Боржомского месторождения и результатов опытной эксплуатации в течение 2015–2018 гг. гидравлическим методом при суммарном водоотборе по всем участкам около 800 м³/сут совместно с методом математического моделирования, были переоценены эксплуатационные запасы. Результаты переоценки по отдельным участкам и месторождению в целом приведены в табл. 3.

Как видно из приведенных результатов прирост запасов составил 374 м³/сут, а их общая величина увеличена более, чем в 1.6 раза по сравнению с их величиной на начало наших работ в 2015 г., причем отмечаем, что запасы кат. С₂ в количестве 137 м³/сут оценены методом математического моделирования сверх достигнутого суммарного водоотбора. Запасы, соответствующие суммарному водоотбору, оценены по кат. В в количестве 683 м³/сут по скважинам при установленном режиме фильтрации и по кат. С₁ в количестве 115 м³/сут методом математического моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровский, Б.В. Оценка запасов углекислых минеральных вод крупных месторождений IV группы сложности при совмещении гидравлического метода и математического моделирования / Б.В. Боровский, В.Ю. Абрамов, Г.Е. Ершов, А.Л. Язвин // Недропользование. — 2019. — № 6. — С. 64–73.
2. Вартамян, Г.С. Гидрогеологическая модель Боржомского месторождения минеральных вод / Г.С. Вартамян, Р.И. Плотникова, Л.А. Хараташвили, Д.В. Чхеидзе // Советская геология. — 1985. — № 3. — С. 105–113.
3. Гамкрелидзе, И.П. К вопросу размещения в пространстве и формирования Боржомской минеральной воды / И.П. Гамкрелидзе, Г.П. Ложбанидзе // Сообщение АН ГССР. — 1983. — Т. 110. — № 1. — С. 77–80.
4. Гамкрелидзе, И.П. Геология Центральной Аджаро-Триалетии и проблемы Боржомской минеральной воды / И.П. Гамкрелидзе, Г.П. Ложбанидзе. — Тбилиси: «Мецниереба», 1984. — 82 с.
5. Овчинников, А.М. Минеральные воды / А.М. Овчинников. — М.: Госгеотехиздат. — 1963. — 375 с.
6. Хараташвили, Л.А. О формировании минеральной воды «Боржоми» / Л.А. Хараташвили / Проблемы гидрогеологии и инженерной геологии. — Тбилиси, 1980. — С. 77–80.
7. Чихелидзе, С.С. Природные ресурсы Грузинской ССР. Минеральные воды / С.С. Чихелидзе. — М.: Изд-во АН СССР. — 1962. — Т. 3. — 438 с.

© Коллектив авторов, 2020

Боровский Борис Владимирович // borevsky@hydec.ru
 Абрамов Владимир Юрьевич // abramov@hydec.ru
 Ершов Григорий Евгеньевич // ershov@hydec.ru
 Секерина Ирина Николаевна // sekerina@hydec.ru
 Язвин Александр Леонидович // alyazvin@hydec.ru
 Корошинадзе Темур // tkoroshinadze@ids-borjomi.com