

УДК 556.3:550.812

ПОИСКИ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ЛЕДНИКОВЫХ ПАЛЕОДОЛИНАХ СЕВЕРНОГО УРАЛА

© 2018 г. А.А. Скалин

Научно-производственное объединение «Уралгеоэкология», г. Екатеринбург,
Россия

Ключевые слова: Уральская гидрогеологическая складчатая область, разведка месторождений подземных вод, эрозионно-тектонические депрессии, интрузивные массивы, ледниковые палеодолины, Северный Урал.



А.А. Скалин

Представлена методика поисков и разведки месторождений пресных подземных вод ледниковых палеодолин в эрозионно-тектонических депрессиях интрузивных массивов Северного и Полярного Урала. Обоснованы поисковые критерии месторождений подземных вод и гидродинамический метод оценки запасов применительно к модели полосообразного пласта двухслойного строения. Рекомендовано рассматривать месторождения в качестве резервных источников промышленного розлива с целью обеспечения питьевой безопасности населения в периоды чрезвычайных ситуаций.

Для обеспечения питьевой безопасности населения в периоды чрезвычайных ситуаций требуются источники высококачественных подземных вод. К числу таких водных объектов можно отнести месторождения в трогах горно-таежной части Северного и Полярного Урала. Однако в ходе последнего этапа региональной оценки запасов в Уральской сложной гидрогеологической складчатой области месторождения природных минеральных столовых вод не рассматривались.

В соответствии с методологией геологоразведочных работ разработана методика поисково-разведочных работ на примере месторождения «Ледниковая долина» с величиной запасов $1500 \text{ м}^3/\text{сут}$, которое успешно эксплуатируется с 2012 г. по лицензии на недропользование.

ПОИСКИ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

В Уральской сложной гидрогеологической складчатой области широко распространены водоносные системы в эрозионно-тектонических депрессиях интрузивных массивов с благоприятными условиями для отбора под-

земных вод. Такие гидрогеологические условия соответствуют общепринятой трактовке понятия «месторождение пресных подземных вод» (МППВ). Для унификации методов поисково-разведочных работ разрабатываются типизации МППВ, наиболее широкое применение нашла типизация Л.С. Язвина и Б.В. Боровского [1, 2]. Согласно заложенным в типизацию идеям, в эрозионно-тектонических депрессиях интрузивных массивов формируются МППВ, относимые к тому или иному типу в ограниченных по площади структурах. В соответствии с «Классификацией запасов и прогнозных ресурсов питьевых, технических и минеральных подземных вод» (Приказ МПР России от 30.07.2007 № 195), месторождения пресных подземных вод относятся к третьей группе и характеризуются, как правило, очень сложными гидрогеологическими условиями. Их обнаружение возможно при совпадении трех поисковых предпосылок: наличия водоносных зон тектонически нарушенных магматических пород; залегания в верхней части водоносной системы водоносных слоев в песчаных отложениях; образования частных водосборов аномально интенсивного поверхностного стока в периоды зимней межени.

Одним из первых на закономерную зависимость водопроницаемости магматических пород от тектонических нарушений обратил внимание Н.Д. Буданов [3]. Его идеи получили развитие при использовании подземных вод в качестве универсального индикатора геомеханики скальных интрузивных массивов при обосновании высотного строительства [4]. Крайняя неоднородность фильтрационных свойств интрузивных массивов в зонах тектонических нарушений и в слабопроницаемых монолитных блоках подтверждается значениями среднеквадратического отклонения логарифма водопроницаемости более 0,75 и величиной коэффициента вариации более 150 [1]. Для сравнения приведем следующие характеристики: водопроницаемость тектонически нарушенных интрузивных пород достигает 250 м³/сут – почти на два порядка выше фоновых значений слабопроницаемых зон региональной трещиноватости магматических пород.

Гравитационная водоотдача водоносных слоев в пористых коллекторах с значениями около 0,1 играет определяющую роль в восполнении ресурсов подземных вод в трещинно-жильных коллекторах тектонически нарушенных магматических пород с величинами около 0,001. Например, за счет периодической сработки емкостных запасов подземных вод в корях выветривания формируется в маловодные годы до 50 % общего водоотбора [5, 6]. При снижении динамических уровней депрессионных воронок ниже кор выветривания прекращается приращение среднемноголетней величины их восполнения.

Частные водосборы аномально интенсивного поверхностного стока образуются при разгрузке стока подземных вод водоносных зон тектониче-

ской трещиноватости интрузивных пород, который обеспечивается за счет регулирующей роли емкостных запасов в перекрывающих водоносных слоях песчаных отложений. На таких водосборах зафиксировано превышение почти на порядок средних величин восполнения ресурсов подземных вод по сравнению с фоновыми значениями. Например, в климатических условиях Среднего Урала их модули составляют $\sim 2,1 \text{ дм}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2$ и $\sim 0,2 \text{ дм}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2$ соответственно [7].

При геолого-коммерческой оценке перспектив поисков МППВ рассматриваемого типа следует учитывать региональные особенности. Так, на Среднем Урале имеют широкое площадное распространение мезозойские коры выветривания, а в высокогорной части Северного Урала элювиальные образования эродированы при движении ледников в неоплейстоцене. В этой связи, руководствуясь принципом иерархии, предлагается выделить два более низких ранга – региональные виды МППВ «среднеуральский» и «североуральский», имеющие свои специфические черты.

Поисковые критерии месторождения пресных подземных вод «североуральского» вида рассмотрим на примере МППВ «Ледниковая долина», обнаруженного в трого на северо-восточном склоне Косьвинского Камня (абс. отм. вершины 1519 м). Для Косьвинского клинопироксенит-дунитового массива, входящего в Платиноносный пояс, характерно концентрически-зональное строение и наличие тектонических контактов дугообразной формы. По результатам геологической съемки масштаба 1:10 000 [8], в восточной части Юдинского дунитового тела обнаружен тектонический контакт между магнетитсодержащими клинопироксенитами и габброидами, к которому приурочена троговая долина. Очевидно, моренные отложения следует относить к полярноуральскому горизонту верхнего неоплейстоцена [9], образовавшегося в период оледенения 12,2–24,5 тыс. лет назад, когда мощность ледникового покрова составляла первые сотни метров. В цирке трого залегают курумники (каменный поток из валунов), а внизу конечная морена представлена тиллитом (валунной глиной), содержащей россыпную платину. Гранулометрический состав моренных отложений закономерно изменяется сверху вниз – от валунов к песчано-гравийно-галечниковым отложениям и далее к глинам с включениями валунов. Следовательно, поисковые предпосылки на обнаружение МППВ «североуральского» вида имеются только в средней части троговой долины в эрозионно-тектонической депрессии. Именно здесь создаются условия для формирования емкостных запасов в гравитационной емкости песчано-гравийно-галечниковых отложений донной морены, которые можно представить в виде «водохранилища подземных вод» с гребнем плотины в тиллитах.

Для определения размеров троговой долины и петрофизических характеристик были выполнены площадные геофизические работы методами магниторазведки и электроразведки. В результате магниторазведки выявлен тектонический контакт между габброидами (фон магнитного поля около 500 нТл) и магнетитсодержащими клинопироксенитами (аномальная интенсивность магнитного поля около 4700 нТл). С помощью вертикальных электрических зондирований построен геоэлектрический разрез вкрест троговой долины (рис. 1): кажущиеся удельные электрические сопротивления моренных отложений 90–200 Ом*м, интрузивных пород 1000–2000 Ом*м, что является типичным [10].

Для подтверждения рабочей гипотезы формирования «подземного водохранилища» в средней части троговой долины были произведены гидрометрические работы на горной реке Северный Кытлымёнок, протекающей вдоль эрозионно-тектонической депрессии с площадью водосбора 18,9 км². Северный Кытлымёнок берет начало из ключа на высоте около 650 м, где курумники переходят в абляционную морену. На абс. отм. 585 м река протекает по тиллитам и не является базисом дренирования для подземных вод, уровень которых залегает примерно на 15 м ниже ее уреза (рис. 1). На гидрометрическом створе с абс. отм. 585 м в период весеннего половодья расходы воды достигают 3 м³/с и более, в то время как значения минимального 30-дневного расхода летне-осенней межени 95 % обеспеченности составляют 0,008 м³/с, минимального месячного расхода зимней межени – 0,0055 м³/с. На отметке примерно 550 м предполагается замещение водоносных песчаных отложений донной морены на слабопроницаемые тиллиты, о чем свидетельствует увеличение меженных аномальных расходов реки почти на порядок в верхнем бьефе «подземного водохранилища».

Таким образом, по установленным поисковым критериям перспективный участок на обнаружение месторождения пресных подземных вод «североуральского» вида с запасами до 2000 м³/сут прогнозируется в троговой долине на высотах с абс. отм. 610 – 550 м.

В результате разведки производится оценка запасов пресных подземных вод, главным методом которой является гидродинамический. Гидрогеологические условия должны схематизироваться для каждого типа месторождения пресных подземных вод в виде определенной модели, что позволяет увеличить геолого-экономическую результативность за счет использования опыта разведки аналогов. Для типа месторождения пресных подземных вод в ограниченных структурах эрозионно-тектонических депрессий является достаточно адекватной модель в плане – в виде полосообразного пласта с условными границами II рода (с постоянным расходом), а в разрезе – двухслойного пласта [11]. При добыче подземных вод из МППВ в эрозионно-

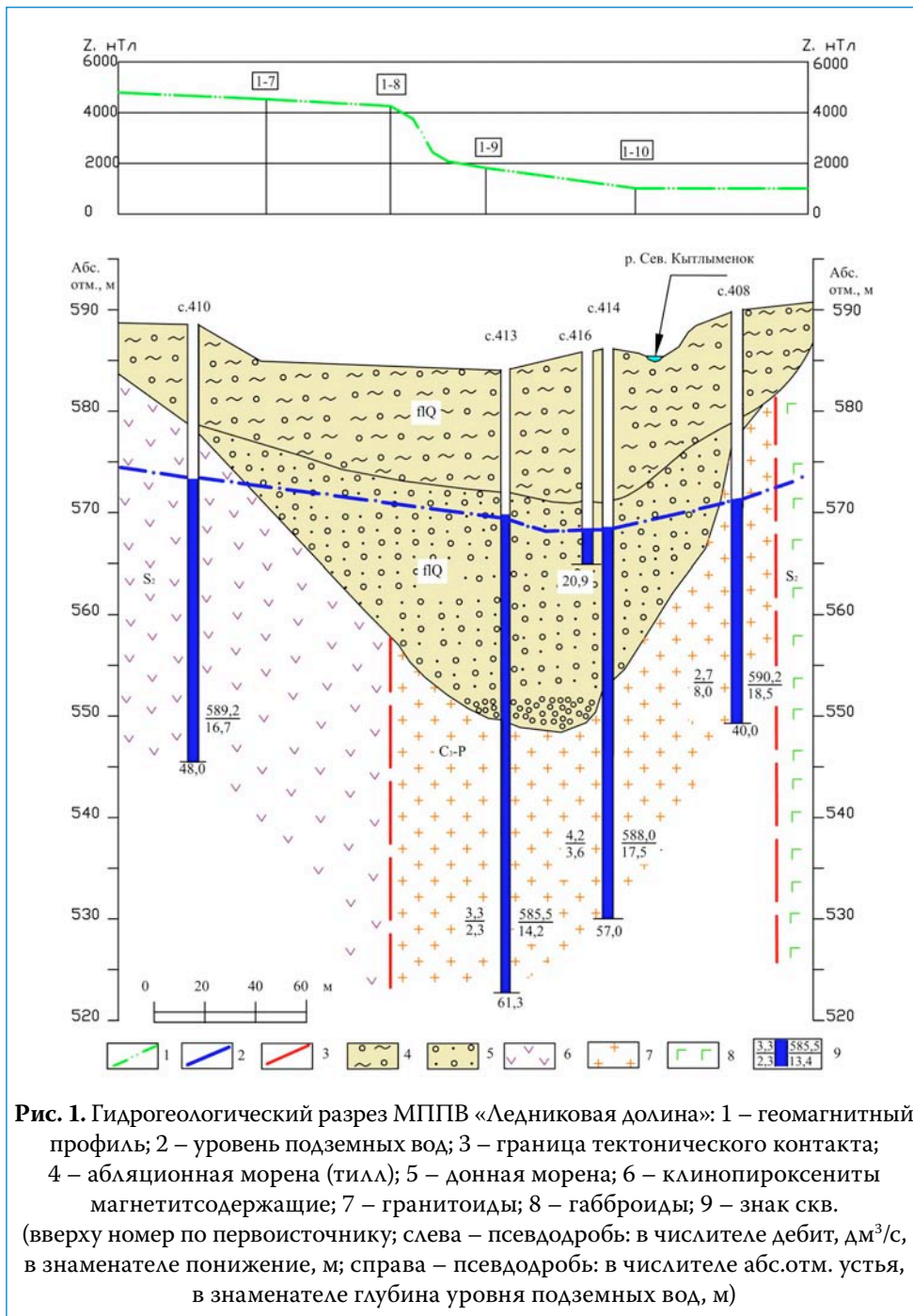


Рис. 1. Гидрогеологический разрез МППВ «Ледниковая долина»: 1 – геомагнитный профиль; 2 – уровень подземных вод; 3 – граница тектонического контакта; 4 – абляционная морена (тилл); 5 – донная морена; 6 – клинопироксены магнетитсодержащие; 7 – гранитоиды; 8 – габброиды; 9 – знак скв. (вверху номер по первоисточнику; слева – псевдодробь: в числителе дебит, $\text{дм}^3/\text{с}$, в знаменателе понижение, м; справа – псевдодробь: в числителе абс.отм. устья, в знаменателе глубина уровня подземных вод, м)

тектонических депрессиях интрузивных массивов происходит обеспечение водоотбора за счет гравитационной водоотдачи верхних водоносных песчаных слоев, а нижняя водоносная зона тектонически нарушенных магматических пород с повышенной водопроницаемостью (естественная подземная дрена) вместе с водозаборными скважинами является средством водоотбора. Согласно этой модели, водозаборный участок обычно проектируется в виде линейного ряда скважин вдоль тальвега эрозионно-тектонической депрессии. Для производства опытно-фильтрационных работ сооружаются ярусные кусты гидрогеологических скважин, включающие наблюдательные скважины на свободную поверхность подземных вод. Обработка опытных кустовых откачек для месторождения пресных подземных вод рассматриваемого типа выполняется с использованием известного уравнения Хантуша – Джейкоба [12, 13]. При откачках процесс динамики водоотдачи от упругой до гравитационной подавляет влияние плановых границ. Продолжительность опытных кустовых откачек определяется временем наступления ложностационарного режима в наблюдательных скважинах на свободную поверхность – примерно через 5–7 сут.

Интенсивность восполнения емкостных запасов МППВ зависит от количества выпадающих атмосферных осадков и гидравлических уклонов потоков подземных вод. Так, например, на Среднем Урале годовые суммы осадков составляют 400–450 мм при модулях подземного стока в эрозионно-тектонических депрессиях около $2 \text{ дм}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2$, а в верхней части горных хребтов Северного Урала достигают 1300–1600 мм при аномальном модуле подземного стока 8–10 $\text{дм}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2$. Однако фоновые значения модулей подземного стока в слабоводопроницаемых блоках интрузивных массивов не зависят от климатических и геоморфологических условий и составляют 0,1–0,3 $\text{дм}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2$ (по данным гидрогеологических съемок масштаба 1:200 000 и карты ресурсов подземных вод Свердловской области в масштабе 1:300 000 [14, 15]).

Существенные различия в величинах нормы общего зонального стока подтверждают целесообразность выделения «среднеуральского» и «североуральского» видов месторождений пресных подземных вод. Дифференцированный подход к оценке запасов пресных подземных вод указанных региональных видов МППВ будет способствовать минимизации георисков их занижения.

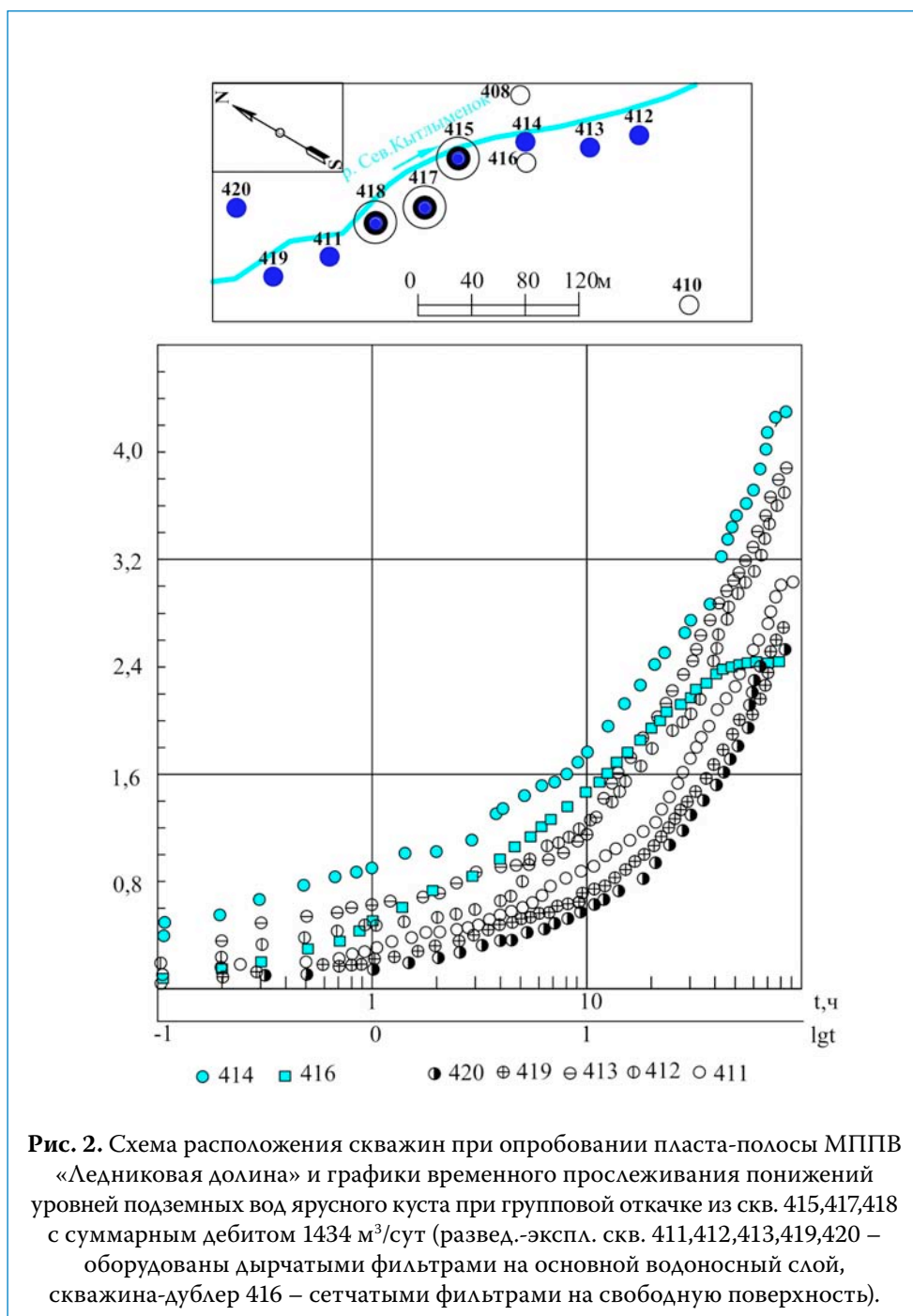
Методику разведки МППВ «североуральского» вида рассмотрим на примере месторождения «Ледниковая долина». Водозаборный участок представлен линейным рядом из семи разведочно-эксплуатационных скважин со средними расстояниями между ними около 40 м, расположенными вдоль тальвега троговой долины с абс. отм. 608–586 м. На данном

участке пьезометрическая поверхность субнапорных подземных вод в тектонически нарушенных жильных гранитоидах выше на 0,3 м уровня подземных вод в донной морене (рис. 1), что зафиксировано в период зимней межени в ярусных пьезометрах 414 и 416. Вдоль тальвега гидравлический уклон поверхности потока субнапорных подземных вод в гранитоидах составил около 0,01. Между р. Северный Кытлымёнок и «подземным водохранилищем» на этой высоте нет гидравлической связи. Так, при откачке из разведочно-эксплуатационной скважины 414 понижение составило 3,21 м, а в скважине-пьезометре 408, расположенной в 60 м на противоположном берегу реки, понижение было 3,86 м (рис. 2). Глубина залегания субнапорных подземных вод вверху ряда достигала 34 м, внизу – 14 м. В этой связи, с позиции геолого-экономических критериев глубины разведочно-эксплуатационных скважин, обсаженных дырчатыми фильтрами, уменьшались от 81 м вверху ряда до 57 м внизу. Скважина-пьезометр 416 на свободную поверхность водоносных слоев в песках донной морены была обсажена сетчатыми фильтрами.

Из всех разведочно-эксплуатационных скважин произведены опытные откачки, отобраны пробы подземных вод для исследования их качества. Удельные дебиты разведочно-эксплуатационных скважин составили в среднем $1,3 \text{ дм}^3/\text{с} \cdot \text{м}$ (при дебите $10 \text{ дм}^3/\text{с}$ и понижении 8 м). В конце зимней межени произведена опытная групповая кустовая откачка из скважин середины ряда 415, 417, 418 с суммарным дебитом $1434 \text{ м}^3/\text{сут}$ (при заявленной потребности $1500 \text{ м}^3/\text{сут}$) и продолжительностью 11 бр/см, которая была прекращена после достижения ложностационарного режима уровней в ярусном пьезометре 416 на свободную поверхность подземных вод в донной морене (рис. 2).

Обработка кустовой откачки производилась с помощью известного графоаналитического метода Хантуша [12, 13], в основе которого лежит уравнение Джейкоба–Хантуша для условий неустановившейся фильтрации в напорном пласте с учетом перетекания из верхнего пласта с постоянным напором. Это допущение связано с тем, что гравитационная водоотдача верхнего слоя примерно на два порядка больше упругой водоотдачи нижнего водоносного слоя в тектонически нарушенных гранитоидах. Необходимо отметить, что динамика изменения водоотдачи от упругой до гравитационной подавляет влияние плановых границ II рода.

По результатам опытной кустовой откачки были приняты для оценки запасов пресных подземных вод следующие расчетные параметры: гравитационная водоотдача донной морены мощностью около 20 м со значениями 0,07 (7 %); водопроницаемость водоносной зоны тектонически нарушенных интрузивных пород шириной 200 м с диапазоном величин



50–100 м²/сут; допустимое понижение 20 м, равное мощности водоносной донной морены; время эксплуатации 200 сут, соответствующее времени частичной сработки емкостных запасов в зимнюю межень. Естественные запасы подземных вод донной морены («водохранилища») ежегодно восполняются за счет инфильтрации талых и дождевых вод в курумниках троговой долины («гидрогеологических окнах»). Расчеты показывают, что естественные запасы подземных вод существенно превышают их сработку в период 200 сут зимней межени при водозаборе 1500 м³/сут. Подсчет запасов гидродинамическим методом с использованием расчетных параметров подтверждает гарантированный водозабор 1500 м³/сут в течение неограниченного срока эксплуатации.

Подземные воды ледниковых палеодолин в ультраосновных массивах МППВ «североуральского» вида характеризуются высоким качеством и соответствуют нормативам физиологической полноценности питьевых вод, относимых к минеральным природным столовым водам. По минерализации подземные воды относятся к ультрапресным (около 150 мг/мд³). По-видимому, подземные воды «заряжаются энергией» векового елово-пихтово-кедрового леса, покрывающего площадь водосбора.

В условиях нарастающего дефицита питьевых вод [16–18] целесообразно охранять месторождения пресных подземных вод «североуральского» вида как резервные источники питьевого водоснабжения населения бутилированной водой.

ВЫВОДЫ

В горно-таежной части Северного и Полярного Урала предполагается обнаружение месторождений подземных вод «североуральского» вида с запасами до 2000 м³/сут в троговых долинах эрозионно-тектонических депрессий интрузивных массивов. Перспективные участки прогнозируются при наличии водоносных зон тектонической трещиноватости магматических пород, перекрытых водоносными слоями в песчаных отложениях донной морены, и при аномальных расходах вод горных рек в периоды зимней межени.

Основным методом оценки запасов подземных вод месторождений «североуральского» вида является гидродинамический. При водозаборах допустимое понижение определяется мощностью водоносных слоев донной морены, емкостные запасы подземных вод в которых восполняются ежегодно в период весеннего половодья и дождевых осадков.

По качеству подземные воды месторождений «североуральского» вида являются близкими к гигиеническим нормативам минеральных природных столовых вод. Эти месторождения должны относиться к особо охраняемым территориям – как источники обеспечения питьевой безопасности населения в периоды чрезвычайных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Боревский Б.В., Дробноход Н.И., Язвин Л.С.* Оценка запасов подземных вод. Киев: Вища школа, 1989. 407 с.
2. *Боревский Б.В., Боревский Л.В., Язвин А.А.* Принципы определения границ месторождений подземных вод // Разведка и охрана недр. 2010. № 10. С. 10–18.
3. *Буданов Н.Д.* Гидрогеология Урала. М.: Наука, 1964. 304 с.
4. *Скалин А.А.* Опыт гидрогеологических изысканий в скальном массиве для высотного строительства «Екатеринбург-СИТИ» // Жилищное строительство. 2017. № 11. С. 7–12.
5. Гидрогеология СССР. Т. XIV. Урал. Уральское территориальное геологическое управление. М.: Недра, 1972. 648 с.
6. *Новиков В.П., Копылов Д.В.* Уточненная гидрогеологическая модель объектов Уральской складчатой области // Разведка и охрана недр. 2018. № 3. С. 36–41.
7. *Владимиров Ю.И.* Внутригодовое изменения стока малых речных бассейнов под влиянием отбора подземных вод в некарстующихся породах горноскладчатой части Среднего Урала // Проблемы загрязнения подземных вод и пути их решения. Красноярск: СибНИИГиМ, 1981. С.73–83.
8. *Иванов О.К.* Концентрически-зональные пироксенит-дунитовые массивы Урала: (Минералогия, петрология, генезис). Екатеринбург: УРГУ, 1997. 488 с.
9. *Стефановский В.В.* Плиоцен и четверть восточного склона Урала и Зауралья. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2006. 223 с.
10. *Кузин А.В., Князева И.В.* Геоэлектрические параметры грунтов в полосе контакта Полярного Урала и Западно-Сибирской равнины по ВЭЗ // Разведка и охрана недр. 2011. № 4. С. 54–57.
11. *Скалин А.В.* Разведка месторождений пресных подземных вод в кайнозойских долинах // Разведка и охрана недр. 1984. № 6. С. 44–48.
12. *Мироненко В.А., Шестаков В.М.* Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М.: Недра, 1978. 325 с.
13. *Скалин А.В., Шабалина Н.С.* Опыт определения параметров олигоценового водоносного горизонта в Зауралье аналитическими и машинными методами // сб. Гидрогеология и инженерная геология. Математические методы анализа информации. Новочеркасск, 1984. С.41–49.
14. *Герасименко Б.Н.* Гидрогеологическая карта СССР масштаба 1:200 000, лист О-40-VI (Карпинск) / «Уралгидроэкспедиция» Уральского территориального геологического управления. Свердловск, 1970.
15. *Герасименко Б.Н.* Карта ресурсов подземных вод Свердловской области масштаба 1:300 000 по состоянию на 2004 г. / ОАО «Уральская геологосъемочная экспедиция». Екатеринбург, 2005.
16. *Яндыганов Я.Я., Власова Е.Я., Скалин В.А.* Водохозяйственный кластер промышленного района (проблемы, эффективность). Екатеринбург: УГЭУ, 2016. 281 с.
17. *Носаль А.П., Шубарина А.С., Сокольских И.И.* Повышение безопасности водоснабжения крупных населенных пунктов в период маловодья (на примере города Екатеринбург) // Водное хозяйство России. 2011. № 6. С. 33–46.

18. Палкин С.В., Палкин С.С., Рыбникова Л.С. К вопросу о возможности полного водообеспечения города Екатеринбурга подземными водами // Водное хозяйство России. 2011. № 5. С.75–88.

Сведения об авторе:

Скалин Антон Анатольевич, технический директор, ООО «Научно-производственное объединение «Уралгеоэкология», Россия, 620027, г. Екатеринбург, ул. Мельковская, 9; e-mail: inform@uralgeoecology.ru, uralgeo@bk.ru