

УДК 551.436:551.491(470.4/5)

ФОРМИРОВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НЕОГЕНОВЫХ ДОЛИН СИСТЕМЫ ПАЛЕО-БЕЛОЙ В ЮЖНОМ ПРЕДУРАЛЬЕ

© 2017 г. Р. Ф. Абдрахманов, В. Г. Попов

*Институт геологии Уфимского научного центра РАН,
ул. К. Маркса, 16/2, Уфа, 450077 Россия.
E-mail: hydro@ufaras.ru*

Поступила в редакцию 21.10.2016 г.

После исправления 10.03.2017 г.

В статье обсуждаются геологические и гидрогеологические последствия тектонических событий, произошедших на востоке Русской плиты и Урале на рубеже миоцена и плиоцена, вызвавшие интенсивную донную эрозию и формирование переуглубленных речных долин системы Палео-Волги. Речная сеть Южного Предуралья была представлена Палео-Белой с разветвленной сетью притоков – Палео-Камой, Палео-Уфой, Палео-Демой и др., глубоко врезаемых в различные стратиграфические комплексы палеозоя (от каменноугольного до верхнепермского включительно). Показано, что в разрезе палеодолин, выполненных, главным образом, глинистыми осадками кинельского надгоризонта мощностью до 150–200 м, наиболее важное гидрогеологическое значение принадлежит базальным песчано-галечниковым осадкам. Вследствие довольно высоких фильтрационно-емкостных свойств они аккумулируют подземный сток, разгружающийся из гипсов, карбонатных и терригенных пород, слагающих склоны и русла палеодолин. Дренирующей роли их способствуют интенсивная трещиноватость и карстованность пород в прибортовых зонах, высокие градиенты напора и скорости движения подземных вод. Не менее важна и экранирующая роль палеодолин. Трещинно-карстовые воды при встрече с заполненными глинами палеодолинами изменяют направление движения с латерального на вертикальное, что вызывает их разгрузку на поверхности в виде крупных карстовых источников (Красный Ключ и др.). Активизация процессов растворения и экстракции солей из пород вдоль бортов палеодолин ведет к образованию подземных и поверхностных карстовых (карстово-суффозионных) форм, сильно осложняющих хозяйственное освоение территорий. Рассмотрено влияние неогеновых и четвертичных долин на развитие карста в нижнепермских гипсах на территории Уфимской промышленно-урбанизированной агломерации. Изложены результаты гидрогеохимических исследований неогеновых долин. Установлена геохимическая зональность подземных вод, заключающаяся в последовательной смене вниз по долине Палео-Белой гидрокарбонатных кальциевых вод сульфатными кальциевыми, сульфатными натриевыми и сульфатно-хлоридными натриевыми. Приведены представления авторов, касающиеся процессов формирования ионно-солевого состава подземных вод.

Ключевые слова: неогеновые долины, р. Палео-Белая, подземные воды, гидрогеохимия, гидрогеодинамика.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из специфических геолого-гидрогеологических особенностей верхнего структурного этажа Южного Предуралья – наличие разветвленной сети речных долин системы Палео-Белой, выполненных толщей неогеновых песчано-глинистых осадков, содержащих подземные воды различного геохимического облика. Первопричиной их образования являются произошедшие на рубеже миоцена и плиоцена восходящие тектонические движения на востоке Русской плиты и Урале,

с одной стороны, и погружение южной части Прикаспийской синеклизы – с другой. Резкое понижение уровня Каспия (до 500 м ниже уровня Мирового океана) – регионального базиса стока Палео-Волги и ее притоков, вызвало интенсивную донную эрозию, в результате которой образовались глубоковрезанные в подстилающие породы долины рек (до 200–300 м), ныне погребенные под более молодыми плиоцен-четвертичными осадками.

Вместе с региональными движениями земной коры Урало-Поволжья большую роль в форми-

ровании и размещении речной палеосети сыграли и тектонические процессы, проявившиеся непосредственно в Предуралье [7]. Именно этими зональными процессами объясняется тектономорфность рельефа региона. Она заключается в тесной пространственной связи речных долин системы Палео-Белой с отрицательными тектоническими структурами (впадинами, депрессиями, седловинами) разного порядка в палеозойском чехле, а возвышенностей и водоразделов — с положительными формами (сводами, брахиантиклиналями и др.). Эти структуры, так или иначе, выражены не только в современном рельефе и осадочном чехле, но и в докембрийском кристаллическом фундаменте, что указывает на унаследованный характер и активность неотектонических (N—Q) процессов [6].

Возникновение и развитие переуглубленной речной сети не только коренным образом трансформировало облик рельефа, но и определило характер и масштабы многих экзогенных геологических процессов — эрозионных, аккумулятивных, склоновых и др. Особенно активно процессы денудации, эрозии и карста протекали на склонах палеодолин, сложенных породами различного возраста и литолого-фациального состава. На них под действием комплекса физико-химических факторов в терригенно-карбонатных и сульфатных осадках сформировалась трещинно-карстовая кора выветривания, в пределах которой шли нисходящие перетоки и происходили смещения вод различных водоносных горизонтов преимущественно пермских отложений и их разгрузка в древние речные долины.

По-существу позднемиocen-раннеплиоценовая эрозия привела к образованию зоны гипергенеза, мощность которой контролировалась глубиной врезания палеодолин в палеозойский субстрат. Коренным образом изменились условия питания, движения и разгрузки подземных вод комплексов палеозоя: верхне- и нижнепермских в пределах краевой части Русской платформы, каменноугольных на западном склоне Урала. Вследствие глубокой расчлененности рельефа в них резко возросла мощность зоны активного водообмена (200 м и более). Это вызвало интенсификацию начавшихся еще в мезозое процессов замещения седиментогенных соленых и рассольных вод — наследия предшествующих элизионных гидрогеологических этапов, пресными инфильтрогенными водами, а также вынос из пород морского и лагунно-морского происхождения сульфатных и хлоридных солей.

Помимо процессов конгруэнтного растворения и выщелачивания солей из палеозойских

комплексов, дренируемых палеодолинами, широкое развитие получили инконгруэнтные обменно-адсорбционные процессы между инфильтрогенными водами и морскими терригенными глинистыми породами, содержащими в поглощенном комплексе адсорбированные ионы натрия. В результате в верхней наиболее промытой части палеозойского разреза образовалась зона пресных вод гидрокарбонатного натриевого состава ($\text{HCO}_3\text{—Na}$), а под ней в загипсованных фациях — зона соленых $\text{SO}_4\text{—Na}$ вод. Иначе говоря, произошла дифференциация подземных вод по составу и величине минерализации (M), т.е. в зоне гипергенеза установилась нормальная вертикальная гидрогеохимическая зональность, близкая современной.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Первые указания на наличие переуглубленного русла р. Волги в районе г. Казани относятся к концу XIX в. [6]. Однако особое научное и практическое значение проблема погребенных долин системы Палео-Волги приобрела только во второй половине прошлого столетия в связи с проведением инженерно-геологических изысканий под строительство крупных гидроэнергетических сооружений и водохранилищ на рр. Волга, Кама, Белая и Уфа, а также поисково-разведочных работ на подземные воды, нефть, газ и другие полезные ископаемые. Наряду с буровыми работами, для обнаружения и выяснения строения погребенных речных долин были широко использованы полевые геофизические, в частности электроразведочные исследования. В Южном Предуралье в решении этих задач важную роль сыграли среднемасштабные геолого-гидрогеологические съемочные работы, выполненные в 1960—1970-е годы Башкирским геологическим управлением (авторы принимали непосредственное участие в этих работах). Они позволили впервые картографически достоверно отобразить местоположение древних долин р. Белой и ее притоков (Камы, Уфы, Быстрого Таныпа, Демы и др.), изучить их морфометрию, литологию и стратиграфию выполняющих осадков неогена, а также гидрогеологические и гидрогеохимические условия, как самих палеодолин, так и окружающих палеозойских комплексов.

При таксономическом расчленении неогеновой осадочной толщи, выполняющей палеодолины Предуралья, использована стратиграфическая схема [8] с изменениями и дополнениями [1]. Согласно ей осадочная толща переуглубленных

долин представлена отложениями кинельского надгоризонта (Nkn), возраст которого датируется от позднего миоцена до среднего плиоцена включительно (6.5–2.6 млн лет). Надгоризонт Nkn состоит снизу вверх из чебеньковского, карламанского, кумурлинского и зилим-васильевского горизонтов. Чебеньковский горизонт (20–60 м) сложен в основном песчано-галечниковым аллювием, а в верхней части – глинами с прослоями песков. Мощность базальной части разреза достигает 40 м. В вышележащих горизонтах (до 150 м) преобладают глины с прослоями алевроитов и глинистых песков озерно-лиманного происхождения. Общая мощность кинельских отложений в осевой, наиболее глубокой части долины Палео-Белой достигает 200 м. В прибортовых частях она сокращается до первых десятков метров и метров. Выше залегают морские осадки аккумуляевского и воеводского горизонтов, соответствующие второй (максимальной) и третьей ингрессиям Акчагыльского моря, а также континентальные четвертичные осадки.

Суммируя сказанное, подчеркнем, что объект исследований авторов – неогеновые долины системы Палео-Белой в Предуралье, предмет исследований – происходящие в них гидрогеодинамические и гидрогеохимические процессы. Цель исследований состоит в определении места подземных вод палеодолин бассейна р. Белая в структуре верхнего гидрогеологического этажа региона.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Долина Палео-Белой по морфологии, геологическому строению и гидрогеологическим условиям делится на 3 части (рис. 1): верховье (горная часть), среднее течение (от выхода Палео-Белой с гор до долины р. Палео-Уфа) и нижнее течение (между долинами рек Палео-Уфа и Палео-Кама).

В песчано-галечниковых отложениях, залегающих в основании кинельского разреза, заключен выдержанный в пределах русел палеодолин чебеньковский водоносный горизонт. В долине Палео-Белой абсолютные отметки его кровли снижаются вниз по течению от +180 до –40 м. Сверху горизонт перекрыт толщей водупорных ниже-среднеплиоценовых глин, что определяет его напорный характер. Величина напора над кровлей горизонта в нижнем течении достигает 110 м, что обеспечивает самоизливы вод через устья скважин, расположенных

на низких абсолютных отметках (+80...+100 м) в долинах современных рек (Сюнь, База и др.). Дебиты скважин при этом достигают 15–20 л/с. Коэффициенты фильтрации водо-вмещающих пород изменяются от 1 до 6 м/сут и более. Пьезометрическая поверхность вод наклонена на северо-запад, согласно погружению русла Палео-Белой; средняя величина уклона потока подземных вод составляет 0.0003, а скорость движения – 2 м/год [4].

Прослои и линзы водоносных песков (0.5–10 м), залегающих среди глин карламанского, кумурлинского и зилим-васильевского горизонтов, имеют спорадическое распространение, главным образом, в нижнем течении Палео-Белой. Фильтрационные свойства пород и дебиты скважин низкие – соответственно 0.1–0.3 м/сут и 0.1–0.5 л/с.

Питание подземных вод кинельских отложений осуществляется, главным образом, за счет вод более древних отложений палеозоя, в которые врезаны долины рек системы Палео-Белой. При этом наиболее значима дренирующая роль базального чебеньковского песчано-галечникового горизонта, куда происходит разгрузка вод комплексов палеозоя (C_1-P_2), слагающих борта и днища палеодолин. В известных гидрогеодинамических ситуациях источником питания может явиться и вышележащий аллювиальный четвертичный водоносный горизонт, который развит в долинах современных рек.

Из этого следует, что гидрогеохимические особенности кинельских водоносных горизонтов, не имеющих открытых областей питания, почти всецело зависят от состава вод питающих комплексов палеозоя. Последние в разных частях региона сложены терригенными, карбонатными и сульфатными пермскими и каменноугольными осадками, отложившимися в морских, континентальных и лагунных бассейнах седиментации. Заключенные в них подземные воды в зависимости от литологии пород имеют различный химический состав и величину минерализации (М). Тем не менее, это типичные гипергенные воды, формирующиеся в гидрогеодинамических зонах активной и затрудненной циркуляции за счет литолого-гидрогеохимических процессов в многокомпонентной гетерогенной системе “вода–осадочная порода”. Главные из них – растворение и выщелачивание, ионообменные и гидролитические взаимодействия, а также процессы смешения вод различного геохимического облика.

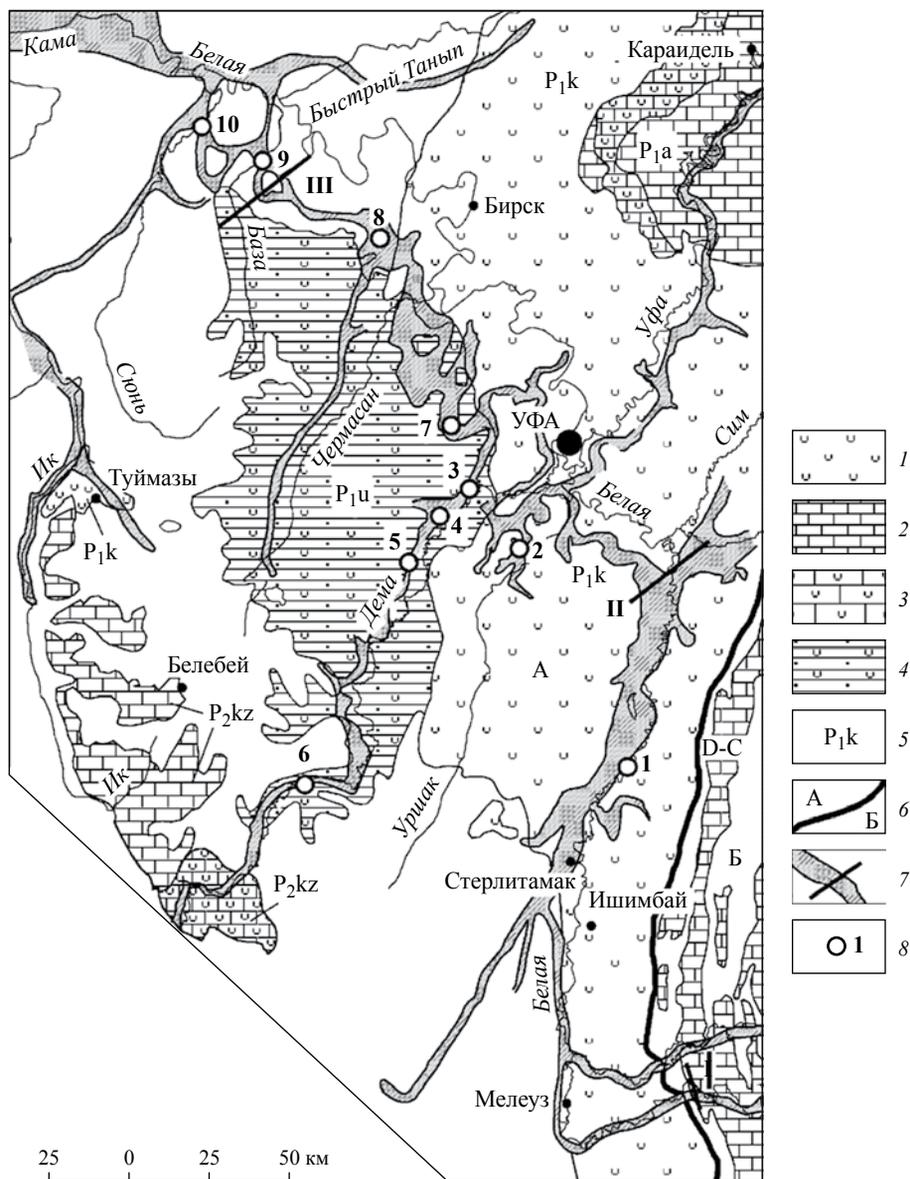


Рис. 1. Схематическая карта долин системы Палео-Белой и типов карста Южного Предуралья: 1–4 – типы карста: 1 – сульфатный, 2 – карбонатный, 3 – сульфатно-карбонатный, 4 – кластокарст спорадического развития; 5 – возраст карстующихся пород; 6 – граница карстовых стран: А – Восточно-Европейская, Б – Уральская; 7 – контур палеодолин и линии геологических разрезов: I – в верхнем течении (створ Юмагузинского водохранилища), II – в среднем течении (устье р. Сим), III – в низовье р. Белая (междуречье База – Белая); 8 – пункт гидрогеохимического опробования и его номер по таблице.

В верховье миоцен-плиоценовая горная р. Белая протекала в субширотном направлении в глубоком (300–500 м) узком (0.5–1.0 км) каньоне с обрывистыми склонами, сложенными каменноугольными карбонатными породами (рис. 2). В современном профиле ее русло находится на наиболее высоких абсолютных отметках (+135...+150 м). Судя по створам Юмагузинского и Нугушского водохранилищ, мощность кинельских отложений достигает 70 м. Из них

20–30 м приходится на базальный валунно-галечниковый горизонт. В подобной ситуации практически единственным источником его питания служат подземные воды каменноугольных пород, разгружающиеся в приобортовой зоне палеодолины. Подтверждается это в частности тем, что наиболее трещиноватым и закарстованным оказался интервал каменноугольного разреза, расположенный между руслами четвертичной и неогеновой долин р.

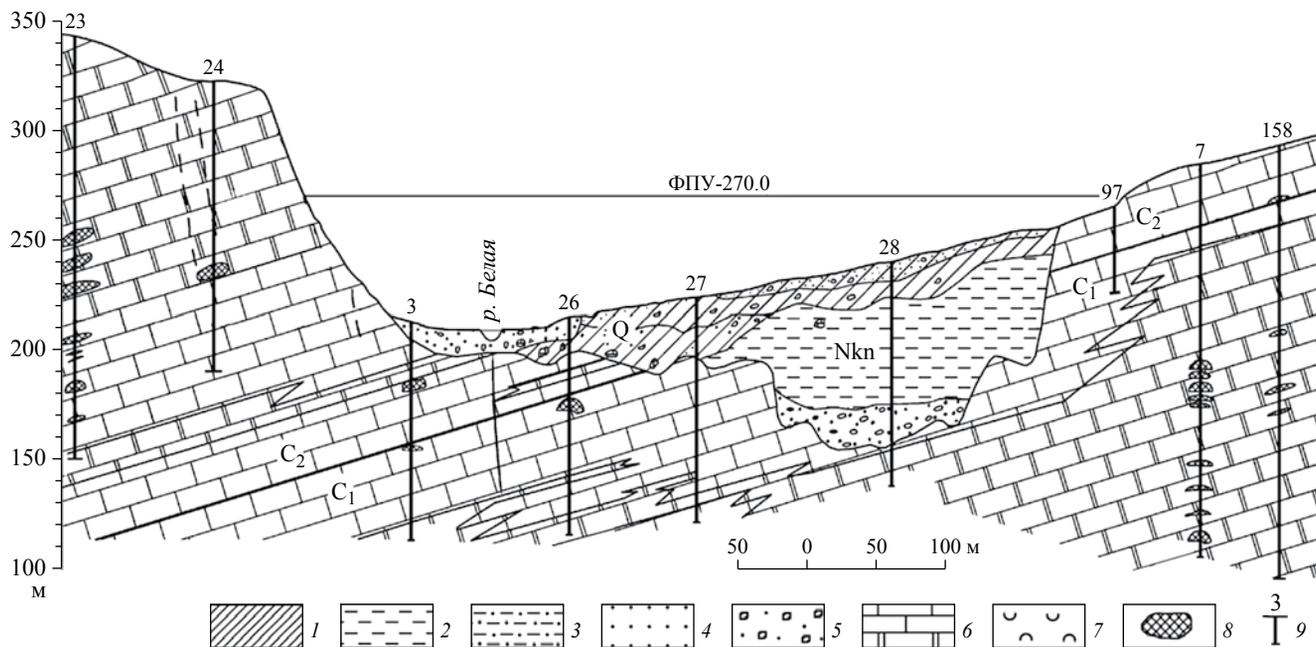
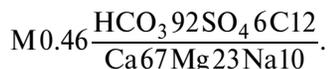


Рис. 2. Разрез I через долину р. Палео-Белая в верхнем течении (створ Юмагузинского водохранилища): 1 – суглинки, 2 – глины, 3 – алевролиты, 4 – пески, песчаники; 5 – гравийно-галечные отложения, 6 – известняки, доломиты; 7 – гипсы, ангидриты; 8 – карстовая пустота; 9 – скважина и ее номер

Белой. Отсюда понятно, что в базальном горизонте заключены $\text{HCO}_3\text{—Ca}$ (Mg—Ca) пресные воды с M 0.2–0.5 г/дм³, в геохимическом отношении идентичные водам источников, вытекающим из каменноугольных известняков передовых складок Урала. Ниже приводится состав одного из них с дебитом 100 л/с, расположенного вблизи Юмагузинского водохранилища:



Воды, как правило, далеки от насыщения карбонатами, что объясняется невысокими концентрациями атмосферного CO_2 (< 50 мг/дм³), высокими скоростями движения вод в карбонатной трещинно-карстовой среде и кратковременным взаимодействием их с вмещающими породами.

В средней субмеридиональной части долины Палео-Белой мощность базального чебеньковского горизонта, залегающего на кунгурских гипсах с соленоватыми (M 1–3 г/дм³) $\text{SO}_4\text{—Ca}$ (Mg—Ca) водами, достигает 55 м. Столь большое “перуглубление” в русле Палео-Белой в месте впадения в нее палеорек Сим, Инзер и Зилим связано с неогеновым карстом [3]. Абсолютные отметки русла палеодолины в районе г. Уфа снижаются до –28 м, а в указанных палеокарстовых впадинах до –50 м (рис. 3). Здесь кинельские отложения

перекрывают четвертичным аллювием, содержащим пресные $\text{HCO}_3\text{—Ca}$ воды. В этих условиях, источниками питания чебеньковского горизонта являются: 1) воды, поступающие транзитом латеральным путем с Урала, 2) порово-пластовые воды аллювиального горизонта и 3) трещинно-карстовые воды гипсов кунгурского яруса.

Значительные объемы этих вод, разгружающиеся в базальный горизонт, вызвали широкое развитие процессов смешения, и, как следствие, трансформацию состава вод в направлении $\text{HCO}_3 \rightarrow \text{HCO}_3\text{—SO}_4 \rightarrow \text{SO}_4$ по мере удаления от Уральских гор. То есть в ходе этих процессов воды кинельского горизонта приобретали геохимический облик гипсовых $\text{SO}_4\text{—Mg—Ca}$ соленоватых вод, изначально присущих гипсам (табл., номера проб 1, 2). Отсюда понятно преобладание в составе вод ионов SO_4^{2-} (80–85%) и Ca^{2+} , Mg^{2+} (в сумме 85–95%).

В пределах современной территории г. Уфа в Палео-Белую впадали два притока: левый – Палео-Дема, и правый – Палео-Уфа. Долина Палео-Демы берет начало на Бугульминско-Белебеевской возвышенности, отвечающей южной вершине Татарского свода. Она вскрывает и дренирует различные литолого-стратиграфические подразделения пермской системы: казанские карбонатно-сульфатные в верховье, уфимские карбонатно-терригенные в среднем и нижнем течении

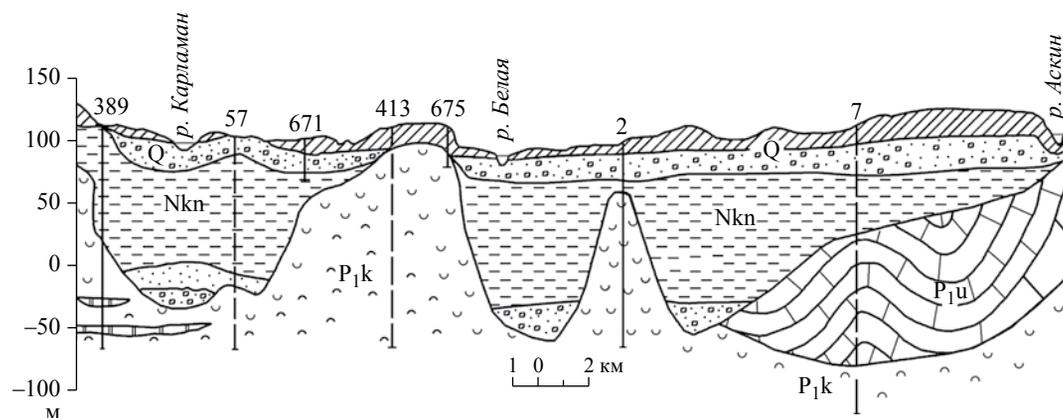


Рис. 3. Долина р. Палео-Белая в среднем течении (устье р. Сим, разрез II). Условные обозначения см. на рис. 2.

и кунгурские сульфатные в низовье. Подземные воды кинельского горизонта в интервале опробования +20...+50 м абсолютной высоты $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$ и $\text{SO}_4\text{-Mg-Ca}$, $\text{Cl-SO}_4\text{-Ca-Na}$, $\text{SO}_4\text{-Na-Mg-Ca}$ с М 1.1–6.3 г/дм³ (см. табл., № проб 3–6). В их составе также преобладают

SO_4^{2-} , Ca^{2+} и Mg^{2+} , но иногда в значительных количествах появляются Cl^- (до 50%) и Na^+ (до 65%), что объясняется поступлением вод из слабо промытых уфимских отложений, залегающих в зоне затрудненной циркуляции и содержащих рассеянные включения галита. Присутствие Na^+

Химический состав подземных вод базального кинельского горизонта

№ проб	Пункт и интервал (м) отбора пробы	Водовмещающие породы	М, г/дм ³	Ионы, мг/дм ³ / %-моль					
				HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$
1	Устье р. Зиган, 80.1-100.3 м	Глины с галькой	3.6	$\frac{235.0}{7.0}$	$\frac{2140}{81.0}$	$\frac{234.1}{12.0}$	$\frac{606.3}{55.0}$	$\frac{207.4}{31.0}$	$\frac{177.1}{14.0}$
2	Устье р. Уязы, 138.0-141.0	Пески, гравий	2.3	$\frac{228.9}{11.0}$	$\frac{1392}{85.0}$	$\frac{48.37}{4.0}$	$\frac{498.9}{73.0}$	$\frac{91.22}{22.0}$	$\frac{39.20}{5.0}$
3	Район с. Арсланово, 61.0-67.0	Пески	1.1	$\frac{327.8}{34.0}$	$\frac{478.1}{63.0}$	$\frac{16.81}{3.0}$	$\frac{139.3}{44.0}$	$\frac{74.93}{39.0}$	$\frac{61.75}{17.0}$
4	Пос. Чишмы, 82.6-85.7	То же	2.5	$\frac{205.7}{9.0}$	$\frac{1547}{86.0}$	$\frac{66.40}{5.0}$	$\frac{367.7}{49.0}$	$\frac{141.2}{31.0}$	$\frac{172.2}{20.0}$
5	15 км южнее пос. Чишмы, 78.0-82.8	- « -	2.7	$\frac{220.8}{9.0}$	$\frac{1738}{90.0}$	$\frac{14.26}{1.0}$	$\frac{483.5}{60.0}$	$\frac{141.8}{29.0}$	$\frac{101.7}{11.0}$
6	Устье р. Мияки, 72.1-73.8	Пески, галечники	6.3	$\frac{181.5}{3.0}$	$\frac{2334}{49.0}$	$\frac{1688}{48.0}$	$\frac{437.2}{22.0}$	$\frac{132.6}{11.0}$	$\frac{1527}{67.0}$
7	С. Шемяк, 70.0-80.0	То же	3.1	$\frac{152.6}{5.4}$	$\frac{2046}{92.2}$	$\frac{39.01}{2.4}$	$\frac{472.9}{51.1}$	$\frac{193.3}{34.4}$	$\frac{154.0}{14.5}$
8	С. Шелканово, 128.0-154.0	Галечники	3.4	$\frac{140.3}{4.4}$	$\frac{2137}{85.4}$	$\frac{187.9}{10.2}$	$\frac{466.9}{44.7}$	$\frac{184.8}{29.1}$	$\frac{312.7}{26.2}$
9	С. Итеево, 95.5-107.0	Пески, галечники	3.8	$\frac{244.1}{6.4}$	$\frac{960.6}{31.6}$	$\frac{1383}{62.0}$	$\frac{440.9}{35.0}$	$\frac{156.0}{20.5}$	$\frac{648.3}{44.5}$
10	С. Аишево, 93.0-96.5	Пески	3.5	$\frac{225.8}{7.1}$	$\frac{1743}{70.1}$	$\frac{418.4}{22.8}$	$\frac{168.3}{16.2}$	$\frac{57.15}{9.2}$	$\frac{889.7}{74.6}$

в сульфатной водной среде объясняется более сложно. В ней наличие Na^+ связано с обменно-адсорбционными процессами между Ca^{2+} сульфатных щелочноземельных вод, с одной стороны, и адсорбированным Na^+ поглощенного комплекса терригенных глинистых осадков – с другой [5].

Истоки Палео-Уфы находились на Уфимском плато, которое образовалось в результате длительной геолого-тектонической эволюции Башкирского свода. Палеодолина дренирует карбонатную толщу (200–250 м) артина, что способствует образованию водообильных карстовых зон, а местами она экранирует потоки трещинно-карстовых вод. В створе Павловского водохранилища ширина долины < 300 м, мощность кинельских отложений в осевой части около 80 м, в том числе 20 м базального песчано-гравийно-галечникового горизонта. Вдоль бортов известняки подверглись интенсивному карстовому процессу. В них, а также в самом базальном горизонте образовались потоки, аккумулирующие огромные ресурсы пресных вод. Об этом можно судить по крупнейшему в мире источнику “Красный Ключ” с дебитом от 6 до 52 м³/с:

$$\text{M}0.26 \frac{\text{HCO}_3 \text{ 82SO}_4 \text{ 13Cl5}}{\text{Ca63Mg19Na18}}.$$

“Красный Ключ” и другие восходящие источники возникли в результате подпруживающего влияния палеодолины [3]. По составу они $\text{HCO}_3\text{—Ca}$ с M 0.2–0.3 г/дм³, высокого питьевого качества¹. Судя по величине M и концентрации HCO_3^- (150–200 мг/дм³), воды не насыщены CaCO_3 и MgCO_3 (дефицит до 50%), т.е. сохранили агрессивность к карбонатным породам. Причина этого – низкие концентрации CO_2 (20–30 мг/дм³), регламентирующего растворимость пород, короткие пути движения (n – $10n$ км) карстовых вод и время нахождения воды в породе ($10n$ – $100n$ сут).

Район слияния трех палеорек (Белой, Уфы и Демы), на территории которого находится крупная современная промышленно-урбанизированная агломерация г. Уфа, в силу специфических геолого-гидрогеологических условий сильно поражен древними и современными карстово-суффозионными процессами. Инженерно-геологическими изысканиями последних лет установлена тесная связь деформаций зданий и сооружений с древними и современными речными долинами.

¹ Источник “Красный Ключ”, расположенный в 80 км от Уфы, рекомендован авторами для централизованного водоснабжения города [3].

Вдоль бортов палеодолин, заполненных неогеново-четвертичными глинисто-супесчаными отложениями, развиты погребенные карстово-суффозионные формы, а также воронки, провалы и другие карстопроявления на поверхности. Активное развитие карстового процесса вызвано значительной выветрелостью гипсов кунгурского и загипсованных карбонатно-терригенных пород уфимского ярусов, а также трещинами бортового отпора, способствующими поглощению атмосферных осадков и техногенных вод из разного рода городских коммуникаций. Доля последних в питании подземного стока достигает иногда 30–50%.

Молодые и “старые” карстовые воронки, тяготеющие к склонам современных и неогеновых рек, обычно образуют скопления – карстовые поля. В г. Уфе и ее окрестностях находятся 63 карстовых поля диаметром до 800 м, в пределах которых плотность воронок варьирует от 10 до 100 на 1 км².

Важно подчеркнуть, что после того как неогеновые долины во время акчагыльской трансгрессии моря были перекрыты более молодыми глинистыми отложениями, их дренирующая роль не была утрачена и сохранилась до настоящего времени. Подземные трещинно-карстовые воды пермских отложений, встречая на пути своего движения препятствие в виде заполненных глинами палеодолин, начинают в зависимости от гидродинамических условий вертикальную (восходящую или нисходящую) фильтрацию с одновременным движением вдоль бортов долин. Увеличение гидравлических градиентов на таких контактах ведет к перемещению тонкодисперсного материала в уже существующие или вновь возникающие карстовые пустоты, т.е. вызывает процесс суффозии.

Вернемся к долине Палео-Белой. В нижнем течении она прослеживается в северо-западном направлении, причем русло ее смещено на 15–25 км к юго-западу относительно современного русла р. Белой. Кинельский горизонт (до 170 м), выполняющий неогеновую долину, представлен всеми своими стратиграфическими подразделениями. Контур палеодолины имеет сложные очертания, русло сильно меандрирует, ширина долины в местах расширений достигает 15 км, а на сужениях уменьшается до 2 км. Абсолютные отметки русла вниз по течению снижаются от –28 м у г. Уфа до –85 м у г. Мензелинск в Татарстане. На фоне плавного погружения русла отмечаются отдельные палеокарстовые впадины, в которых мощность

базальных галечников достигает 70 м. Крутизна склонов долины изменяется от 5° до 30°.

В этой части долины Палео-Белой в питании кинельского песчано-галечникового коллектора принимают участие воды только нижнепермских (кунгурских и уфимских) отложений. Четвертичный водоносный горизонт р. Белой утратил эту функцию вследствие пространственной разобщенности современной и неогеновой долин. Движение латерального потока вод в базальном горизонте происходит в северо-западном направлении к магистральной долине Палео-Волги.

Гидрогеохимические и гидродинамические данные указывают на разгрузку вод кинельского базального горизонта и в нижележащие карбонатные ассельско-артинские отложения [4]. В них под руслом палеодолины появились опресненные рассолы с M 13–94 г/дм³ на фоне крепких рассолов (M 159–241 г/дм³). Важно подчеркнуть, что те и другие имеют $Cl-Ca-Na$ состав, низкую величину коэффициента $r_{Na/rCl}$ (0.77–0.80), что указывает на присутствие седиментогенной составляющей. Таким образом, при смешении собственно ассельско-артинских рассолов с водами кинельского горизонта происходит резкое снижение минерализации, тогда как геохимический облик вод не претерпевает изменений.

Нисходящее движение вод под руслом Палео-Белой через сульфатно-карбонатные кунгурские осадки мощностью до 50 м обеспечивается разностью уровней вод над- и подкунгурских горизонтов. Если статические уровни вод уфимских отложений, дренируемых палеодолиной, достигают 200 м, то напор рассолов артинского комплекса < 100–120 м. В результате создается градиент напора, необходимый для возбуждения перетекания из верхних горизонтов в подкунгурскую толщу и разубоживания заключенных в ней рассолов.

Гидрогеологические условия в нижней части долины Палео-Белой неоднородны. На участке от Уфы примерно до широты Бирска палеодолина вскрывает гипсы кунгурского яруса. В них заключен водоносный горизонт, область питания которого находится на западном склоне Уфимского плато в местах выхода гипсов на поверхность. Плотность карстовых воронок в пределах отдельных карстовых полей изменяется от 50 до 500 на 1 км², а коэффициент закарстованности достигает 0.25. На дне воронок отмечаются поноры, способствующие поглощению атмосферных и поверхностных вод. Поток формирующихся здесь трещинно-карстовых SO_4-Ca вод направлен на

юго-запад к четвертичной долине Белой, где происходит его частичная разгрузка, и на запад к современной и неогеновой долинам р. Быстрый Танып. Пустоты карстового происхождения высотой до 5.0 м распространены в иренских (P_{1kir}) и соликамских (P_{1usl}) растворимых сульфатных породах в интервале абсолютных отметок +60...–40 м, т.е. выше и даже несколько ниже врезе переуглубленной долины. Поэтому базальный кинельский горизонт Палео-Белой является местом окончательной разгрузки подземного потока в соликамско-кунгурских гипсах.

Следует указать на один заслуживающий внимания факт, касающийся геологической деятельности трещинно-карстовых вод. Интенсивная циркуляция их в прибортовых частях долины Палео-Белой вызвала экстракцию каменной соли, залегающей в виде включений, прослоев и линз среди иренских карбонатно-сульфатных осадков. По данным нефтяного бурения, соль в полосе 2–5 км вдоль русла палеодолины оказалась полностью выщелоченной. Эта зона характеризовалась значительными гидравлическими уклонами и повышенными скоростями трещинно-карстовых вод. Судя по тому, что в базальных кинельских галечниках сейчас преобладают солоноватые (M 2.5–3.4 г/л) $SO_4-Mg-Ca$ воды с фоновыми концентрациями $NaCl$ (см. табл., № пробы 7), процессы выщелачивания галита протекали, главным образом, в предшествующую неоген-плейстоценовую эпоху и к настоящему времени завершены.

В связи с кинетикой гидрогеохимических процессов в системе “гипсы – подземные воды” большой интерес представляют результаты исследований В.П. Зверева [2], выполненных в сопредельных с исследуемой территорией районах Прикамья и Поволжья. Предложенные автором уравнения позволяют оценить количество $CaSO_4$, способного перейти в раствор, т.е. установить степень агрессивности воды по отношению к гипсам. Показано, что в зависимости от гидродинамических условий, состава, M и форм нахождения элементов воды могут пребывать в состоянии разной степени насыщения $CaSO_4$. Не касаясь пересыщенных высокоминерализованных растворов, укажем, что гипсовым водам Южного Предуралья присущ, главным образом, первый тип сульфатно-кальциевого равновесия, по В.П. Звереву, когда при величине $M = 2.2-3.0$ г/дм³, $r_{Ca^{2+}} \cong r_{SO_4^{2-}}$ (отношение между ними составляет 0.9–1.1). Учитывая довольно высокую скорость растворения $CaSO_4$ в зоне гипергенеза, наличие в ней ненасыщенных сульфатами вод может быть

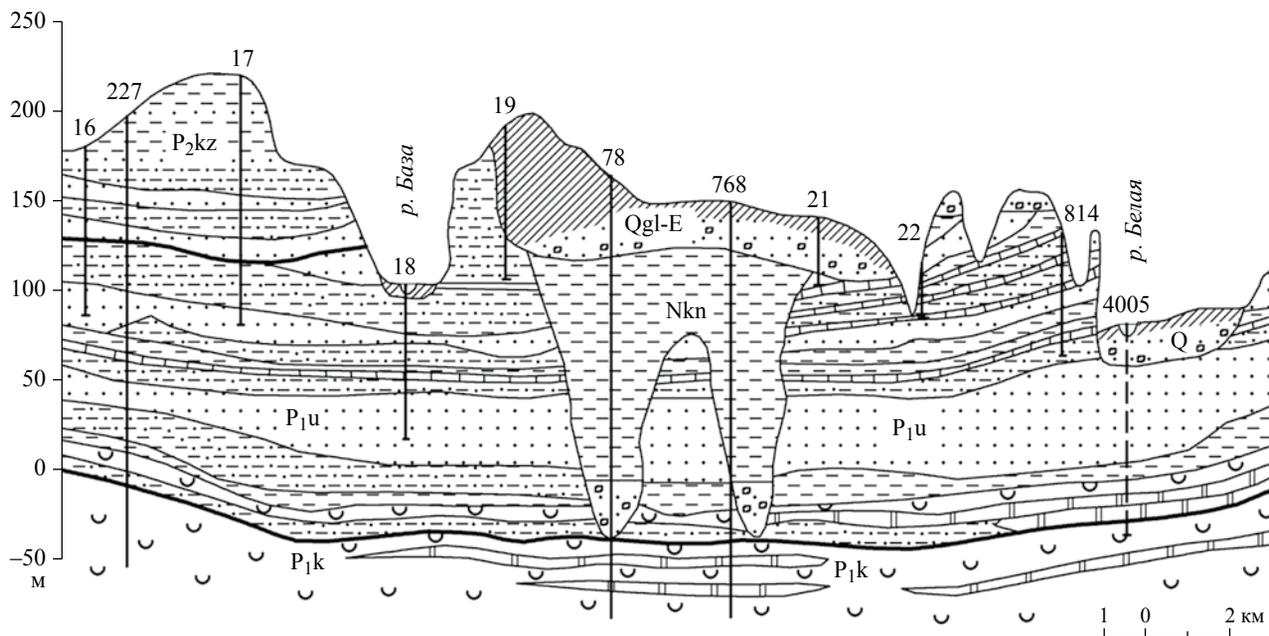


Рис. 4. Долина р. Палео-Белая в низовье (междуречье База – Белая, разрез III). Условные обозначения см. на рис. 2.

объяснено очень кратковременным пребыванием инфильтрационных карстовых вод в гипсах или же процессами смешения $\text{SO}_4\text{--Ca}$ вод с пресными $\text{HCO}_3\text{--Ca}$ водами.

Что касается р. Быстрый Танып, то его палеодолина заполнена в основном глинистыми осадками зилим-васильевского горизонта мощностью 20–40 м. Прослой (до 3,5 м) глинистых песков имеют очень низкую водообильность. В зоне контакта водоупорных глин плиоцена с водоносными кунгурскими гипсами на удалении 10–15 км от открытой области питания трещинно-карстовых вод отмечается ряд высокодебитных (50–120 л/с) источников $\text{SO}_4\text{--Mg--Ca}$ состава. Своим происхождением они обязаны подпору со стороны выполняющих палеодолину глинистых пород плиоцена. На этом участке разгрузка сульфатных вод кунгурского горизонта осуществляется и в аллювий Быстрого Таныпа, этим объясняются повышенная М и сульфатный состав вод в левобережной части долины.

Глинистые осадки зилим-васильевского, карламанского и кумурлинского горизонтов мощностью около 70 м вскрыты и на левом борту долины Палео-Камы вблизи места слияния с Палео-Белой. Они залегают под четвертичными аллювиальными отложениями. В глинах встречаются маломощные (1–3 м) прослой глинистых песков и алевритов, при опробовании которых удельные дебиты скважин не превышали сотых долей л/с.

Сама же палеодолина Белой в крайнем низовье врезана в неподверженные карстовым процессам терригенные шешминские отложения уфимского яруса ($\text{P}_{1\text{uss}}$) (рис. 4). Кунгурские гипсы находятся вне сферы дренирующего воздействия Палео-Белой и представляют собой водупор, разделяющий осадочный чехол на 2 этажа с принципиально различными условиями формирования и генезисом подземных вод.

Базальный чебенковский горизонт залегает на глубине от 90 м в долинах левых притоков р. Белой (Сюнь, База, Чермасан и др.) до 140 м на водоразделах. Подземным водам свойственен довольно сложный геохимический облик. Преобладают $\text{SO}_4\text{--Na--Mg--Ca}$ и $\text{Cl--SO}_4\text{--Na}$ воды с М 3,1–3,5 г/л (см. табл., № проб 8, 10). Источники SO_4^{2-} и Na^+ (до 75–85%) – выщелачивание гипса и обменная адсорбция, протекающие в сульфатизированных терригенных глинистых породах уфимского возраста:



Литолого-гидрогеохимическим моделированием установлено [5], что кинетика этих процессов носит многоступенчатый поступательный характер, благодаря чему подвергающиеся метаморфизации $\text{SO}_4\text{--Ca}$ воды ($\text{M} < 3 \text{ г/дм}^3$) преобразуются в $\text{SO}_4\text{--Na}$ ($\text{M} 5\text{--}15 \text{ г/дм}^3$).

Иногда встречаются воды смешанного $\text{SO}_4\text{--Cl--Mg--Ca--Na}$ состава с М 3–5 г/дм³ (см. табл., № пробы 9). В них Mg^{2+} и Na^+ , судя по

всему, связаны с выщелачиванием из пород солей морского происхождения NaCl и MgCl_2 .

Песчаные прослои, залегающие среди глинистых прослоев, карламанского и курмурлинского горизонтов, вскрыты в долинах Палео-Белой и ее притоков Палео-Таныпа и Палео-Камы. Они получают питание из карбонатно-терригенных уфимских отложений, залегающих в зоне активного водообмена, а в долине Палео-Камы – и из четвертичного аллювия. Воды имеют M 0.5–0.9 г/дм³ при $\text{HCO}_3\text{--Mg--Ca}$ и $\text{SO}_4\text{--HCO}_3\text{--Mg--Ca--Na}$ составе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Восходящие тектонические движения на рубеже миоцена и плиоцена в восточной части Русской плиты и на Урале с одновременным погружением южной части Прикаспийской впадины привели к формированию переуглубленных речных долин системы Палео-Волги. Впоследствии они были заполнены песчано-глинистыми осадками кинельского горизонта, ныне погребенного под акчагыльско-четвертичными отложениями. В Южном Предуралье речная сеть того времени была представлена Палео-Белой и ее притоками – Палео-Камой, Палео-Уфой, Палео-Демой и др., врезанными (до 200–300 м) в различные комплексы палеозойского субстрата, от нижнекаменноугольных до верхнепермских включительно. Важнейшее последствие этих событий – образование в верхней части стратисферы зоны гипергенеза со свойственными ей гидрогеодинамическими процессами и гидрогеохимическими взаимодействиями в многокомпонентной гетерогенной системе “вода–порода”.

Глубокая расчлененность рельефа обусловила увеличение мощности зоны активного водообмена и, как следствие, интенсификацию начавшихся еще в мезозое процессов замещения седиментогенных минерализованных вод – наследия предшествующих элизионных гидрогеологических этапов, пресными инфильтрованными водами, а также выноса из пород морского и лагунно-морского происхождения сульфатных и хлоридных солей. Внедрение атмосферных вод, геохимически чуждых пермским морским терригенным фациям, определило развитие обменно-адсорбционных процессов, вызвавших образование $\text{HCO}_3\text{--Na}$ и $\text{SO}_4\text{--Na}$ вод. Так, в верхней части осадочной толщи установилась нормальная гидрогеохимическая зональность, близкая к современной.

Особо важная гидрогеологическая роль в неогеновых долинах принадлежит базальному песчано-галечниковому горизонту, обладающему наиболее высокими фильтрационно-емкостными свойствами. В нем происходит аккумуляция подземного стока, разгружающегося из гипсов, карбонатных и терригенных пород, слагающих склоны и русла палеодолин. Сочетание трещиноватости и закарстованности пород, с одной стороны, и высоких гидравлических градиентов в зонах контактов с бортами палеодолин – с другой, обеспечивает перелив вод из окружающих пород в базальный горизонт. Палеодолины оказывают дренажное влияние вот уже более 6.5 млн лет. Оно не утрачено до сих пор, на что указывают многочисленные поверхностные и подземные карстовые и карстово-суффозионные формы, сильно осложняющие создание и эксплуатацию инженерных сооружений (в частности в г. Уфа).

Геохимия подземных вод неогеновых долин, не имеющих открытых областей питания, определяется, главным образом, водами палеозойских комплексов. Поэтому вниз по палеодолине р. Белой на расстоянии порядка 450 км в базальном горизонте происходит последовательная смена вод: $\text{HCO}_3\text{--Mg--Ca}$ (M 0.2–0.5 г/дм³) → $\text{SO}_4\text{--Ca}$ (M 1–3 г/дм³) → $\text{SO}_4\text{--Na}$ (M 3–5 г/дм³ и выше) → $\text{SO}_4\text{--Cl--Na}$ ($M > 3$ г/дм³). Если в первых двух случаях гидрогеохимические особенности всецело определяются процессами конгруэнтного растворения карбонатных пород и гипсов, то в образовании $\text{SO}_4\text{--Na}$ и $\text{SO}_4\text{--Cl--Na}$ вод принимают участие более сложные в кинетическом отношении обменно-адсорбционные процессы. В любом случае геохимическое состояние вод неогеновых долин во многом контролируется процессами смешения с водами палеозоя.

Выполненные исследования дают основание утверждать, что переуглубленные неогеновые долины системы Палео-Белой – неотъемлемая часть гидрогеологической структуры Предуралья; они играют ключевую роль в гидрогеодинамике и гидрогеохимии верхнего структурного этажа региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данукалова Г.А. Региональная стратиграфическая схема миоцена Предуралья и основные события на территории Южноуральского региона // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2012. Т. 20. № 5. С. 1–18.

2. Зверев В.П. Гидрогеохимические исследования системы гипсы – подземные воды. М.: Наука, 1967. 99 с.
3. Карст Башкортостана / Кол. авт.: Р.Ф. Абдрахманов, В.И. Мартин, В.Г. Попов и др. Уфа: РА Информреклама, 2002. 383 с.
4. Попов В.Г. Формирование подземных вод Северо-Западной Башкирии. М.: Наука, 1976. 159 с.
5. Попов В.Г., Абдрахманов Р.Ф. Ионообменная концепция в генетической гидрогеохимии. Уфа: Гилем, Башкирская энциклопедия, 2013. 356 с.
6. Рождественский А.П. Новейшая тектоника и развитие рельефа Южного Предуралья. М.: Наука, 1971. 303 с.
7. Сиднев А.В. История развития гидрографической сети плиоцена в Предуралье. М.: Наука, 1985. 224 с.
8. Яхимович В.Л., Немкова В.К., Дорофеев П.И. Плиоцен Башкирского Предуралья (кинельская свита) // Кайнозой Башкирского Предуралья. Т. 2. Ч. 2. Уфа: Изд-во БФАН СССР, 1965. 316 с.

REFERENCES

1. Danukalova, G.A. *Regional'naya stratigraficheskaya skhema miotsena Predural'ya i osnovnye sobytiya na territorii Yuzhnoural'skogo regiona* [The regional stratigraphic scheme of Miocene in CisUrals and the main events on the territory of South Urals region]. *Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyatsiya*, 2012, vol. 20, no. 5, pp. 1–18 (in Russian).
2. Zverev, V.P. *Gidrogeokhimicheskie issledovaniya sistemy gipsy-podzemnye vody* [Hydrogeochemical studies of gypsum-groundwater system]. Moscow, Nauka, 1967, 99 p. (in Russian)
3. *Karst Bashkortostana* [Karst in Bashkortostan]. Abdrahmanov, R.F., Martin, V.I., Popov, V.G., Rozhdestvenskii, A.P., Smirnov, A.I., Travkin, A.I. Ufa, Informreklama Publ., 2002. 383 p. (in Russian).
4. Popov, V.G. *Formirovanie podzemnykh vod Severo-Zapadnoi Bashkirii* [Formation of underground water in the North-West of Bashkortostan]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 159 p. (in Russian).
5. Popov, V.G., Abdrahmanov, R.F. *Ionoobmennaya kontseptsiya v geneticheskoi gidrogeokhimii* [The Ion Exchange Concept in Genetic Aqueous Geochemistry]. Ufa, Gilem Publ., 2013, 356 p. (in Russian).
6. Rozhdestvenskii, A.P. *Noveishaya tektonika i razvitie rel'efa Yuzhnogo Priuralya*. [Recent tectonics and the landform development of the South Cis-Urals Region], Moscow, Nauka Publ., 1971. 304 p. (in Russian).
7. Sidnev, A.V. *Istoriya razvitiya gidrograficheskoi seti plitsena v Predural'e* [The history of the development of the hydrographic network of the Pliocene in the Urals.]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 224 p. (in Russian).
8. Yakhimovich, V.L., Nemkova, V.K., Dorofeev, P.I. *Pliotsen Bashkirskogo Predural'ya (kinel'skaya svita)* [Pliocene of Bashkir Urals (Kinelsky suite)]// *Kainozoi Bashkirskogo Predural'ya* [Cenozoic of Bashkir Cis-Urals]. T. 2. P. 2. Ufa, BFAN SSSR Publ., 1965. 316 p. (In Russian).

GROUNDWATER FORMATION IN THE PALEO-BELAYA RIVER VALLEY SYSTEM IN NEOGENE IN THE SOUTHERN CIS-URALS

R. F. Abdrahmanov, V. G. Popov

*Institute of Geology, Ufa Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
ul. K. Marksa 16/2, Ufa, 450077 Russia.
E-mail: hydro@ufaras.ru*

The article discusses the geological and hydrogeological consequences of tectonic events that occurred in the east of the Russian Platform and the Urals at the turn of the Miocene and Pliocene. They cause intense erosion of the bottom and the formation of the Paleo-Belaya river valley system deeply incised (up to 200–300 m) at different stratigraphic Paleozoic complexes (from the Lower Carboniferous to Upper Permian). It is shown that the basis they are draining sands and gravels, lying at the base of Kinel superhorizon, is composed mainly of clay sediments. Due to the specific conditions of occurrence and the permeability and porosity of the basal aquifer, it accumulates underground drainage discharged from the gypsum, carbonate and clastic rocks that form the slopes and bottoms paleovalleys. The attention is focused on enhancing the processes of dissolution and leaching riverain paleovalley areas, which lead to the formation of surface and underground karst (karst-suffusion) forms greatly complicating the economic development of karst areas. The results of hydrogeochemical research in the Neogene regional valleys reveal the lateral geochemical zoning of groundwater, which consists in the succession of the downstream river Paleo-Belaya water: calcium bicarbonate replacing first by calcium sulfate, next sodium sulfate and sodium sulfate-chloride. The authors share their ideas on the basic processes responsible for the formation of ion-salt composition of groundwater.

Keywords: *Neogene valley, Paleo-Belaya River, groundwater, hydrogeochemistry, hydrogeodynamics.*