

## Гидрогеологическая стратификация Московского артезианского бассейна для целей реализации проектов CCUS

*Я. В. Садыкова*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация  
e-mail: SadykovaYV@ipgg.sbras.ru

**Аннотация.** На основе комплексной интерпретации данных по стратиграфии, литологии, седиментологии и результатов гидрогеохимических опробований Московского артезианского бассейна построена схема детальной гидрогеологической стратификации. Выделены водоносные этажи, комплексы, водоносные и водоупорные горизонты, охарактеризован состав подземных вод. Прослежено их распространение по площади, установлены основные типы гидрогеологических разрезов.

**Ключевые слова:** гидрогеологическая стратификация, водоносные горизонты, Восточно-Европейская платформа, Московский артезианский бассейн, Воронежская антеклиз, Московская синеклиза

## Hydrogeological stratification of the Moscow artesian basin for the purposes of implementing CCUS projects

*Ya. V. Sadykova*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian  
Federation

Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation  
e-mail: SadykovaYV@ipgg.sbras.ru

**Аннотация:** A scheme of detailed hydrogeological stratification of Moscow artesian basin was constructed on the basis of complex interpretation of results of hydrogeochemical analysis of ground waters and the data of stratigraphy, lithology, sedimentology, geology and hydrogeology. The water-bearing stages, complexes, aquifers and seals were allocated. Groundwater composition are characterized. Different types of hydrogeological section are given.

**Keywords:** hydrogeological stratification, aquifers and seals, East European platform, Moscow artesian basin, Voronezh antecline, Moscow syneclise

### *Введение*

Рост содержания углекислого газа в атмосфере в результате антропогенного воздействия является в настоящее время наиболее острой экологической проблемой. Изменение состава атмосферы, насыщение ее парниковыми газами приводит к потеплению климата, таянию ледников, изменению уровня мирового океана. По результатам исследования Международного энергетического агентства (IEA), с 1973 по 2020 гг. объемы эмиссии CO<sub>2</sub> увеличились с 15,5 по 32,3 млн т. Среди крупнейших эмитентов CO<sub>2</sub> Россия находится на четвертом месте (4,6 %),

после Китая (30,7 %), США (13,8 %) и Индии (7,1 %) [1]. Наибольшая доля выбросов углекислого газа приходится на предприятия черной металлургии, цементной промышленности и энергетики. Спрос на продукцию этих отраслей постоянно растет. Применение технологии улавливания и захоронения углерода (CCUS) всемирно признано самым эффективным способом снижения объема выбросов крупных промышленных предприятий. Наибольшее количество предприятий-эмитентов CO<sub>2</sub> сосредоточено в Европейской части Российской Федерации, в связи с этим наиболее привлекательным для создания объектов геологического хранения углекислого газа является Московский артезианский бассейн (рис. 1).

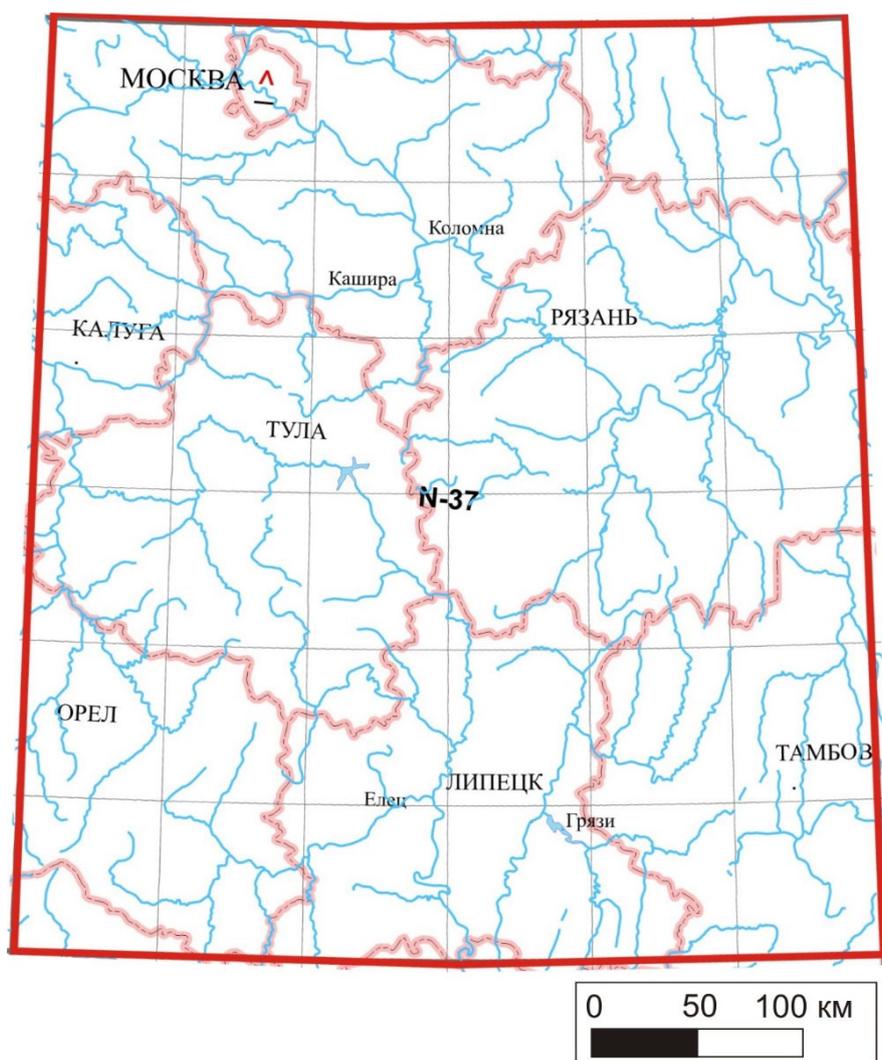


Рис. 1. Обзорная карта центральных районов Московского артезианского бассейна

Действующие проекты захвата и утилизации CO<sub>2</sub> (секвестрации) в России в настоящее время отсутствуют, однако существуют благоприятные предпосылки для захоронения больших объемов углекислого газа в глубокозалегающие водоносные горизонты, не используемые для питьевого и хозяйственного водоснабжения.

Захоронение углекислого газа в недра связано с нарушением естественных гидрогеологического, гидродинамического и геотермического режимов и может приводить к загрязнению атмосферы, обусловленному возможной утечкой CO<sub>2</sub> через литологические окна и дизъюнктивные нарушения. В связи с этим, при выборе объекта для захоронения необходимо иметь четкое представление о геологическом строении региона, его гидрогеологических особенностях, таких как наличие подходящих водоносных горизонтов, способных вместить большие объемы углекислого газа и флюидоупоров, которые будут препятствовать его дальнейшей вертикальной миграции. Таким образом, основной целью данного исследования было выделение водоупорных и водоносных горизонтов в разрезе и прослеживание их распространения по площади Московского артезианского бассейна.

### ***Методы и материалы***

В гидрогеологической стратификации при расчленении разрезов выделяются следующие основные подразделения: водоносные и водоупорные горизонты, водоносные комплексы, ярусы и этажи [2]. В результате детального анализа имеющейся информации по стратиграфии, литологии, седиментологии, гидрогеологии авторами была составлена схема детальной гидрогеологической стратификации Московского артезианского бассейна. Названия водоносных подразделений дано по их приуроченности к подразделениям общей стратиграфической шкалы, утвержденной Межведомственным стратиграфическим комитетом России (МСК) в 2019 г. [3]. Наименования горизонтов даны в соответствии с названиями ярусов, комплексов – систем, ярусов – эратем, их индексация осуществлена в соответствии с Методическими рекомендациями по составлению схем гидрогеологической стратификации [2].

Выделение базировалось на литологическом описании состава слагающих пород (более 1500 интервалов), их фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС), фациальных особенностях. Кроме того, были проанализированы данные испытания скважин и результаты гидрогеохимического опробования водоносных горизонтов (более 200 объектов), используемых для питьевого, технического и бальнеологического использования. В процессе исследования также использовался каталог месторождений подземных вод Российской Федерации и их запасов (по состоянию на 01.01.2012 г.), включающий более 3000 объектов по Московскому артезианскому бассейну.

Исследуемый регион слабо изучен глубоким бурением как по площади, так и в разрезе. Основные скважины пробурены для питьевого водоснабжения, они редко достигают глубоких горизонтов. Отдельными скважинами вскрыты полностью протерозойские, палеозойские, мезозойские и кайнозойские осадки.

### ***Результаты***

В геологическом строении Московского бассейна выделяются два гидрогеологических этажа нижний – весьма затрудненного и застойного водообмена и верхний – активного водообмена. Нижний этаж включает в себя зону трещи-

новатости архейско-нижнепротерозойского фундамента, верхнепротерозойские (рифейский и вендский) и палеозойские (кембрийский, ордовикский, силурийский, девонский, каменноугольно-триасовый) комплексы (табл. 1). Кембрийский, ордовикский и силурийский комплексы распространены локально на территории исследования.

Верхний этаж представлен юрско-меловым, палеоген-неогеновым и четвертичным водоносными комплексами, сложенными слабосцементированными осадками, весьма неравномерно распространенными по площади бассейна, максимальные глубины, приуроченные к речным долинам и отрицательным тектоническими структурам, достигают 400 м. В пределах зоны активного водообмена распространены преимущественно пресные гидрокарбонатные кальциевые и магниевые воды с минерализацией до 1 г/дм<sup>3</sup>, по мере погружения водоносных горизонтов минерализация и содержания хлорид-иона и натрия возрастает. Зоны инфильтрационного питания подземных вод приурочены к окраинным частям бассейна и участкам выхода водоносных горизонтов на поверхность, дренируются преимущественно речной сетью [4, 5].

К четвертичному водоносному комплексу 8(Q<sub>4</sub>) относятся отложения плейстоцена, неоплейстоцена и голоцена. Эти осадки развиты повсеместно, залегают на разновозрастных дочетвертичных отложениях (от верхнедевонского до неогенового возраста), имеют различную мощность от первых метров до 120-130 м в погребенных речных долинах и областях развития ледниковых комплексов. Максимальные толщины, связанные с широким развитием ледниковых отложений, фиксируются в северо-западной и северной части региона, а минимальные - на юге региона, где господствуют аллювиальные и лессовые осадки [6]. Воды четвертичных горизонтов используются для сельскохозяйственных целей и питьевого водоснабжения, они пресные с минерализацией от 0,1 до 0,9 г/дм<sup>3</sup> преимущественно гидрокарбонатного кальциевого и кальциево-магниевого состава. Часто воды загрязнены, особенно вблизи населенных пунктов, где возрастает содержание нитратов, аммиака, железа [7].

Водоносные горизонты палеогеново-неогенового комплекса (8(P-N)) приурочены к эоценовым и олигоценным осадкам палеогена и к миоценовым и плиоценовым отложениям неогена, распространены фрагментарно, преимущественно в пределах бассейнов рек и погребенных речных долин [8]. Мощность и ресурсы неогенового комплекса незначительны, питание осуществляется преимущественно за счет инфильтрации атмосферных осадков. Воды маломинерализованные (от 0,1 до 1,3 г/дм<sup>3</sup>) гидрокарбонатные кальциевые, широко используются для сельскохозяйственных целей.

Юрские и меловые отложения характеризуются прерывистым распространением. Выделяются следующие горизонты: 1) туронско-кампанский водоносный горизонт сложен песками, алевролитами, глинами, опоками, опоконидными песчаниками, мергелями; 2) туронский относительно водоупорный горизонт состоит из писчего мела с фосфоритами; 3) титонско-сеноманский горизонт приурочен к мощной толще верхнеюрских и нижнемеловых отложений, сложенных

преимущественно песками глинистыми кварцевыми, глауконитовыми со стяжениями фосфоритов.

Таблица 1

Схема детальной гидрогеологической стратификации  
Московского артезианского бассейна

Водоносный этаж	Водоносный ярус	Водносный комплекс	Водоносный (2) /относительно водоупорный (3) и водоупорный (4) горизонт	Индекс	
верхний 1(J-Q)		четвертичный 8(Q)	современный аллювиальный		
			верхне-среднечетвертичный		
нижний 9(Ar-P)	кайнозойский (Mz-Kz)	юрско-меловой 8(J-K)	палеогеново-неогеновый 8(P-N)		
			туронско-кампанский	2(K <sub>2</sub> t-km)	
			туронский	3(K <sub>2</sub> t)	
			титонско-сеноманский	2(J <sub>3</sub> tt-K <sub>2</sub> s)	
			келловейско-киммериджский	4(J <sub>2</sub> k-J <sub>3</sub> km)	
		байосско-батский	3(J <sub>2</sub> b-bt)		
		каменноугольно-триасовый 8(C-T)	уржумско-оленинский	2(P <sub>2</sub> ur-T <sub>1</sub> o)	
			казанский	2(P <sub>2</sub> kz)	
			ассельский	4(P <sub>1</sub> a)	
			верхнегжельский	2(C <sub>3</sub> g <sub>2</sub> )	
			верхнегжельский	4C <sub>3</sub> g <sub>2</sub> )	
			нижнегжельский	2(C <sub>3</sub> g <sub>1</sub> )	
			касимовский	3(C <sub>3</sub> k)	
			московский	2(C <sub>2</sub> ms)	
			московский	4(C <sub>2</sub> ms)	
			верхнесерпуховско-башкирский	2(C <sub>2</sub> s <sub>2</sub> )	
			верхнесерпуховский	4(C <sub>2</sub> s <sub>1</sub> )	
			верхневизейско-серпуховский	2(C <sub>1</sub> v-C <sub>2</sub> s)	
			нижневизейский	3(C <sub>1</sub> v <sub>1</sub> )	
			нижневизейский	2(C <sub>1</sub> v <sub>1</sub> )	
			турнейский	2(C <sub>1</sub> t)	
			турнейский	4(C <sub>1</sub> t)	
			верхнефаменский	3(D <sub>3</sub> fm <sub>3</sub> )	
		девонский 8(D)	фаменский	2(D <sub>3</sub> fm <sub>2</sub> )	
			нижнефаменский	4(D <sub>3</sub> fm <sub>1</sub> )	
			верхнефранский	2(D <sub>3</sub> f <sub>3</sub> )	
			верхнефранский	4(D <sub>3</sub> f <sub>3</sub> )	
			среднефранский	2(D <sub>3</sub> f <sub>2</sub> )	
			нижнефранский	4(D <sub>3</sub> f <sub>1</sub> )	
			живетский	2(D <sub>2</sub> zv)	
			верхнеэйфельский	4(D <sub>2</sub> ef <sub>2</sub> )	
			эйфельский	3(D <sub>2</sub> ef)	
			эмсский	2(D <sub>1</sub> em)	
			силурийский 8 (S)	руданско-шейнвудский	2(S <sub>1</sub> r-S <sub>1</sub> sh)
				флоско-хирнатский	2(O <sub>1</sub> f-O <sub>3</sub> h)
			кембрийско-ордовикский 8(O-€)	тремадокский	4(O <sub>1</sub> t)
		майско-тремадокский		2(€ <sub>2</sub> m-O <sub>1</sub> t)	
		томмотский		4(€ <sub>1</sub> tm)	
		верхне-протерозойский (PR <sub>2</sub> )	вендский 8(V)	верхневендский (поваровский)	2(V <sub>2</sub> )
				верхневендский (редкинский)	4(V <sub>2</sub> )
				нижневендский (лапландский)	2(V <sub>1</sub> )
			рифейский 8(Rf)		
			архейско-нижнепротерозойская зона трещиноватости 10(Ar-Pr <sub>1</sub> )		

В разрезе также присутствуют прослои глин, алевролитов, фосфоритов. Толща распространена не равномерно на территории исследования от небольших слоев до 250 м [8]. Наиболее полный разрез характерен для центральных районов Московской синеклизы; 4) келловейско-киммериджский водоупорный горизонт представлен терригенными рыхлыми слабОВОдоносными отложениями, с существенным преобладанием битуминозных глауконитовых глин. Также присутствуют прослои песков и глинистых алевролитов, часто встречаются угли, синдеритовые конкреции, линзы железистых оолитов, стяжения фосфоритов; 5) байосско-батский относительно водоупорный горизонт состоит из глинистых пород кудиновской, москварецкой толщ и их аналогов [9-11].

Источником питания юрских и меловых горизонтов служат атмосферные осадки, туронско-кампанский и титонско-сеноманский горизонты используются для сельскохозяйственного водоснабжения колодцами и скважинами. Надежные водоупорные толщи между горизонтами отсутствуют. В разрезе юрских и меловых осадков распространены преимущественно пресные гидрокарбонатные натриевые воды с минерализацией 0,2-1,0 г/дм<sup>3</sup>. В ряде районов наблюдается превышение ПДК по железу и общей жесткости.

Водоносные горизонты нижнетриасовых и пермских отложений распространены на северо-востоке региона. Они залегают непосредственно под юрскими осадками, представлены тремя горизонтами – первый состоит из пестроцветных сульфатно-карбонатных пород ветлужской серии нижнего триаса и татарского отдела верхней перми. Нижезалегающие горизонты сложены сульфатными и сульфатно-карбонатными породами приуральского и биармийского отделов перми [8, 7, 12]. Уржумско-оленекский горизонт имеет спорадическое распространение и незначительную водонасыщенность, распространен на глубине от 24 до 190 м, состоит из красноцветных глин, алевролитов и зеленоцветных песчаников с прослоями мергелей и известняков, доломитов и гипсов. Воды залегают в линзах песчаников, в трещинах известняков и доломитов. В целом, для водоносных горизонтов характерен водонапорный режим. В местах отсутствия келловейско-киммериджского флюидоупора горизонт питается за счет вышезалегающих горизонтов и дренажа атмосферных осадков. Воды в основном сульфатные или хлоридно-сульфатные натриевые достигают минерализации до 25 г/дм<sup>3</sup>, в большинстве случаев не пригодны для питья и водоснабжения в связи с повышенной минерализацией и неравномерной водонасыщенностью, но используются для лечебных целей. В Ивановской и Костромской областях используется для питьевых целей, содержит воды с минерализацией 0,2 - 0,9 г/дм<sup>3</sup> хлоридного натриевого состава, в ряде скважин превышены предельно-допустимые концентрации по железу и общей жесткости.

Казанский водоносный горизонт приурочен к карбонатным и сульфатно-карбонатным отложениям [7, 8]. Воды в окраинных частях бассейна пресные, в центральных – соленые, в связи с наличием мощных прослоев гипсов и ангидритов. В местах неглубокого залегания характеризуется высокой закарстованностью и водообильностью и широко используется для питьевого водоснабжения. Минерализация колеблется от 0,3 до 0,6 г/дм<sup>3</sup>, в составе преобладает гидрокар-

бонат-ион и кальций. Глубина залегания изменяется от 20 до 280 м. Общий сток направлен с юга на север, в том же направлении возрастает напорность и минерализация подземных вод, но падает водообильность до сухих скважин местами встречаются пресные.

В каменноугольных отложениях выделяются верхнегжельский, нижнегжельский, московский, верхнесерпуховско-башкирский, верхневизейско-серпуховский, нижневизейский и турнейский водоносные горизонты, которые разделены преимущественно глинистыми водоупорами.

Верхнегжельский водоносный горизонт распространен не повсеместно, в районах распространения имеет мощность от 15 до 60 метров, увеличивается в северо-западном направлении [8]. Сложен водоносными трещиноватыми известняками и доломитами. Питание горизонта в основном инфильтрационное, происходит на периферических участках его распространения и в местах неглубокого залегания и малой мощности перекрывающих отложений [13]. Горизонт содержит воды от пресных гидрокарбонатных кальциевых и сульфатных до соленоватых хлоридных натриевых с минерализацией 0,1–10,3 г/дм<sup>3</sup>. Минерализация возрастает в направлении движения подземных вод от зон питания к зонам разгрузки - к речным долинам. В местах распространения пресных вод является объектом питьевого водоснабжения (Владимировская, Тверская, северные районы Московской области). Верхнегжельским водоупорным горизонтом выступают мергели и глины щелковской толщи добрятинской серии мощностью до 25 метров [13].

Нижнегжельский водоносный горизонт в границах распространения имеет мощность 30-50 метров и залегает под верхнегжельским. Состоит так же из трещиноватых известняков и доломитов. Там, где они выходят на дневную поверхность или залегают под маломощными мезо-кайнозойскими осадками в составе преобладают пресные гидрокарбонатные кальциевые воды с минерализацией 0,2-0,4 г/дм<sup>3</sup>. По мере погружения пород в северо-восточном и северном направлениях возрастает минерализация и гидрокарбонатный тип сменяется на сульфатный и затем хлоридный. Минерализация достигает 5 -35 г/дм<sup>3</sup>. В местах распространения пресных вод горизонт используется для питьевых целей. Касимовский относительно водоупорный горизонт сложен мергелями и глинами, глинистыми доломитами кревкинской, хамовнической и дорогомилловской серий мощностью до 100 метров.

Московский водоносный горизонт сложен органогенными и доломитизированными известняками с прослоями глин и мергелей [13]. Мощность достигает 90 метров. Зонами питания являются участки отсутствия вышезалегающих отложений, разгрузка осуществляется в долинах крупных рек - Волги, Москвы, Оки и др. [8]. Водообильность горизонта не равномерная: на участках, где отложения залегают под мезо-кайнозойскими воды характеризуются минерализацией 0,2-0,6 г/дм<sup>3</sup> и преобладанием гидрокарбонатного кальциевого и магниевого состава. Минерализация возрастает по мере погружения слоев до 10-20 г/дм<sup>3</sup> и преобладает сначала сульфат-ион, а затем и хлорид-ион. Часто для горизонта характерно

высокое содержание железа, достигающее  $10 \text{ мг/дм}^3$ . Московский водоупорный горизонт представлен глинистой частью верейской серии.

Верхнесерпуховско-башкирский горизонт сложен белыми перекристаллизованными «сахаровидными» известняками, доломитизированными известняками и доломитами. Известняки нередко закарстованные [13]. На части территории горизонт уничтожен довирейской эрозией. Водообильность не постоянная и зависит от степени закарстованности и трещиноватости пород. Наибольшая водообильность наблюдается по периферии площади его распространения, там наименьшая глубина залегания и наибольшая трещиноватость. С глубиной трещиноватость затухает и уменьшается водообильность, за исключением зон развития тектонических разломов. По химическому составу воды преимущественно гидрокарбонатные кальциевые с минерализацией до  $1,0 \text{ г/дм}^3$ , встречаются сульфатные с минерализацией  $1,1-1,3 \text{ г/дм}^3$ , по мере погружения переходят в хлоридные натриевые с минерализацией до  $20 \text{ г/дм}^3$  [4, 5].

Верхневизейско-серпуховский горизонт отделен от вышезалегающего пачкой черных жирных сланцеватых глин стешевского горизонта мощностью до 10 м, которые местами чередуются с прослоями доломитов и мергелей. Сам горизонт сложен тонкоплитчатыми известняками с линзами и прослоями кремней имеет мощность 20-30 м и мощной толщей трещинных известняков (окских) с прослоями глин и песков (40-80 м). Породы часто загипсованы [13]. По периферии площади распространения на западе и юге не имеет надежной кровли и часто перекрыт четвертичными и мезо-кайнозойскими осадками [8]. На этих участках мощность горизонта минимальная и составляет не более 50 м, наблюдается интенсивная трещиноватость и закарстованность, здесь происходит инфильтрационное питание горизонта и фиксируется самая большая водообильность. Разгрузка осуществляется в долинах рек Волги, Оки и др. Гидростатический напор возрастает по направлению к осевой части московской синеклизы по мере погружения кровли горизонта, в том же направлении уменьшается водообильность. Воды относятся к пресным гидрокарбонатным кальциевым с минерализацией до  $0,7 \text{ г/дм}^3$ . По мере возрастания минерализации увеличивается количество сульфат-иона. В наиболее погруженных частях Московской синеклизы минерализация закономерно возрастает до  $20 \text{ г/дм}^3$ , местами достигает  $190 \text{ г/дм}^3$ .

Нижневизейский водоносный горизонт приурочен к мелкозернистыми кварцевыми песками (подугольным), выделяемым в нижней части бобриковской свиты, в верхней части которой распространены темно-серые углистые глины с прослоями углей и известняков, относящихся к нижневизейскому водоупорному горизонту [13]. Мощность водоносного горизонта от 30 до 90 м. Водоносными являются песчаные слои, в этом отличие горизонта от выше и ниже лежащих. Для водоснабжения редко используется из-за сложного строения коллектора.

Турнейские отложения имеют непостоянную мощность от 0 до 70 метров, в связи с размывом и перерывом в осадконакоплении между турнейским и везейским веками. В восточной части бассейна турнейские отложения были полностью размывы. На западе они отсутствуют на поднятиях и погребенных долинах.

Верхнетурнейские отложения почти повсеместно размыты, только в Тульской области встречается толща до 33 м мелко-тонкозернистых песков с прослоями глин и углей в верхней части, приуроченный к эрозионным впадинам довизейского рельефа [8]. Наиболее близко к дневной поверхности горизонт залегает на юго-западе региона, а наиболее глубоко - в центральных частях Московской синеклизы. Воды горизонта по химическому типу относятся к гидрокарбонатным кальциевым с минерализацией от 0,8 г/дм<sup>3</sup>, наблюдается высокое содержание железа и запах сероводорода. По мере углубления горизонта возрастает содержание ионов хлорида и натрия и увеличивается минерализация до 10-14 г/дм<sup>3</sup> и более. Области питания приурочены к водоразделам между долинами бассейнов крупных рек, а в самих долинах происходит их разгрузка [4, 5].

Девонские отложения распространены практически повсеместно на исследуемой территории, отсутствует лишь в пределах отдельных участков сводовой части Воронежской антеклизы. Внешние области питания приурочены к главному и центральному девонским полям, и склонам Воронежской антеклизы, где они залегают вблизи поверхности, дренируются даже небольшими речками и атмосферными осадками и имеют наибольшую водообильность. В этих областях распространены наиболее пресные воды. В направлении центральной части московского бассейна глубина залегания водоносных горизонтов и их соленость возрастает, а водообильность существенно падает.

В девонских отложениях выделяются следующие водоносные горизонты: фаменский, верхнефранский, среднефранский, живетский, эйфельский относительно водоупорный и эмсский.

Отложения фаменского яруса распространены практически повсеместно [8]. В верхней части горизонта залегает мощная (до 80-100 м) сульфатно-карбонатная толща, состоящая из гипсов, глин, доломитов и доломитовых мергелей хованского и озерского горизонтов, относящихся к верхнефаменскому относительно водоупорному горизонту. В отдельных местах гипс образует слои мощностью 30-40 м. Водовмещающими породами фаменского водоносного горизонта являются трещиноватые и сильно кавернозные доломиты, известняки с прослоями и включениями гипса и ангидрита, а на северо-западе пески и песчаники, с прослоями пестроцветных глин и мергелей, залегающие под водоупорной тощей. Суммарная мощность горизонта от 50 до 200 м [14, 15]. Глубина залегания возрастает в северном и северо-восточном направлении. Основное направление движения подземных вод от водораздельных пространств в сторону речных долин, которые служат зонами разгрузки подземных вод. Водообильность меняется в широких пределах и зависит от закарстованности вмещающих пород. Воды характеризуются различной минерализацией от пресных до рассолов [4, 5]. Пресные гидрокарбонатные натриево-кальциевые или сульфатные магниевые-кальциевые распространены на западе, юге и юго-западе, где горизонт перекрыт четвертичными осадками или маломощными каменноугольными, минерализация не превышает 0,4-0,6 г/дм<sup>3</sup>, а глубина залегания 80-100 м. Горизонт используется для питьевого водоснабжения в Тамбовской, Рязанской, Калужской, Тульской областях. В более глубокозалегающих горизонтах минерализа-

ция возрастает до 1,5-3,0 г/дм<sup>3</sup> и тип вод переходит в гидрокарбонатный-сульфатный магниевый-кальциевый. Далее в северо-восточном направлении с глубиной залегания возрастает и минерализация до 15-200 г/дм<sup>3</sup>, преобладает хлоридный натриевый тип вод и отмечаются высокие концентрации брома и йода. Нижнефаменский водоупорный горизонт сложен не выдержанными по простиранию слоями глин и мергелей елецкого горизонта и плотными известняками, мергелями и глинами задонского горизонта.

Верхнефранский водоносный горизонт развит повсеместно. Водовмещающими породами являются кавернозные и органогенно-обломочные известняки, в нижней части глинистые известняки евлановской и ливенской свит [14, 15]. Общая мощность от 40 до 80 м. Состав вод изменяется от гидрокарбонатных натриевых на западе в области питания до хлоридных кальциево-натриевых рассолов с минерализацией 50-220 г/дм<sup>3</sup> в наиболее погруженных частях территории исследования. Водоупорами в подошве выступают глины, мергели и глинистые известняки воронежской и петинской свит, относящихся к верхнефранскому водоупорному горизонту. В пределах северного склона воронежской антеклизы происходит опесчанивание водоупорного горизонта.

Среднефранский водоносный горизонт приурочен к известнякам и доломитизированным известнякам, песчаноподобным доломитам семилукской и саргавской свит, надежно изолированным в кровле и подошве глинисто-мергелистыми породами нижнефранского водоупорного горизонта (ястребовская, чаплыгинская и верхи огаревской толщи) [14, 15]. Воды комплекса изменяются по площади распространения от маломинерализованных на западе, до сульфатных и хлоридных натриевых с минерализацией 70-190 г/дм<sup>3</sup>.

Залегающий ниже живетский водоносный горизонт, сложен пестроцветными песками, песчаниками, алевролитами и глинами старооскольской серии. Пески и песчаники обладают высокими ФЕС – пористостью 25-35 % и хорошей проницаемостью. Но линзы водоносных пород распространены не равномерно по площади и по разрезу. Наиболее водообильные породы наблюдаются на севере региона. Средняя мощность горизонта 80-100 м. Горизонт содержит напорные воды различной минерализации и состава. Наименее соленые хлоридные натриевые с минерализацией не более 50 г/дм<sup>3</sup> характерны для зон питания подземных вод, расположенных на западе и юге исследуемого региона. В центральных и северных частях минерализация возрастает до 200 -250 г/дм<sup>3</sup> и возрастает роль сульфат-иона и кальция в составе, фиксируется повышенное содержание брома и бора. Живетский водоносный горизонт имеет повсеместное распространение. Залегающая ниже глинистая черная свита является региональным водоупорным горизонтом мощностью 20-30 м [14, 15].

Эйфельский относительно водоупорный горизонт сложен в верхней части глинистыми известняками и известковистыми глинами, известняками и мергелями мосоловской свиты, ниже по разрезу в клинцовской свите среди известняков возрастает количество ангидритов и глин. В отдельных районах в разрезе встречаются примесь туфового материала. В подошве залегает пласт каменной соли и ангидритов, относящихся к дорогобужской свите. Общая мощность гори-

зонта составляет 120-250 м. В пределах воронежской антеклизы дорогобужская и клинцовская свиты развиты не повсеместно и имеют малую мощность [14, 15]. Водоносные породы обладают низкими ФЕС. Воды комплекса высокоминерализованные, минерализация возрастает от областей питания на юге (4-5 г/дм<sup>3</sup>) и западе региона к северным и центральным частям до 180-250 г/дм<sup>3</sup>. Тип вод изменяется в том же направлении от сульфатного кальциево-натриевого к хлоридному натриевому и хлоридному кальциево-натриевому. Рассолы содержат высокие концентрации бора, брома и йода [4, 5].

Эмский водоносный горизонт (нижний эйфель) сложен терригенными отложениями: разномерными песками, песчаниками с прослоями алевролитов и глин ряжской свиты [14, 15]. В подошве горизонта наблюдаются конгломераты. В южных районах отложения горизонта залегают непосредственно на породах фундамента, в северных и центральных – перекрывают осадки ордовика, кембрия, венда и рифея. Воды комплекса являются высококонцентрированными рассолами с минерализацией 100-250 г/дм<sup>3</sup>. Только в южной и западной части региона содержатся воды с минерализацией от 4,5 до 50 г/дм<sup>3</sup> сульфатные магниево-кальциевые воды с переходом в хлоридные натриевые. Водообильность горизонта низкая, содержащиеся рассолы характеризуются сульфатно-хлоридным кальциево-натриевым составом и минерализацией 260-280 г/дм<sup>3</sup> [4, 5].

Силурийские отложения представлены терригенно-карбонатными породами лландоверийского и венлокского отделов, объединяемых в руданско-шейнвудский водоносный горизонт. Водовмещающие отложения представлены глинистыми доломитами, часто кавернозными, с прослоями известняков, мелкозернистых песчаников и алевролитов мощностью от 42 до 250 м. Горизонт распространен на севере и западе Московского артезианского бассейна [7, 8].

Ордовикские отложения развиты только на севере региона и вскрыты опорными скважинами на глубине около 2000 м. Представлены толщей аргиллитов с прослоями мергелей, известняков и доломитов мощностью более 160 м. В нижней части толщи наблюдаются высоко глауконитовые пески и песчаники. В результате опробования скважин получены хлоридные натриевые рассолы с минерализацией 150-300 г/дм<sup>3</sup> и высоким содержанием брома [4].

Кембрийские отложения распространены так же на севере территории исследования и не размыты только на отдельных участках. Осадки представлены мелкозернистыми песками и песчаниками с подчиненными прослоями глин. Мощность (от 20 до 105 м) и глубина залегания толщи (1100-1800 м) существенно варьируются. По составу комплекс близок с ордовикским и не имеет достаточно надежных водоупорных толщ между ними. Флюидоупором в подошве служат «синие» глины балтийского комплекса, относящиеся к томмотскому водоупорному горизонту. В результате опробования скважин получены хлоридные натриевые рассолы с минерализацией 150-250 г/дм<sup>3</sup> [4].

Вендский водоносный комплекс широко развит в регионе, залегают трансгрессивно либо на породах рифея, либо непосредственно на кристаллическом фундаменте. Комплекс представлен плохо отсортированными грубозернистыми песчаниками, переслаивающимися с аргиллитами, алевролитами, глинами, ту-

фами. [16]. Отложения построены циклично, в разрезе преобладают глинистые разности. В верхней части комплекса преобладают бурые и зеленые тонкослоистые глины с подчиненными прослоями песчаников, алевролитов, известняков, доломитов и мергелей, который относится к поваровской серии и обособляется в верхневендский водоносный горизонт. В средней части можно выделить редкинский водоупорный горизонт. А в подошве комплекса залегает базальный горизонт, состоящий из крупных окатанных обломков кристаллических пород древлянской серии [16]. Нижневендский водоносный горизонт развит только на северо-западе исследуемого региона и занимает незначительную площадь. Общая мощность комплекса составляет от 70 до 600 м [8]. В результате опробования скважин получены сверхкрепкие рассолы с минерализацией 200-300 г/дм<sup>3</sup> хлоридного натриевого типа с высоким содержанием кальция и брома. При неглубоком залегании вендского комплекса минерализация вод понижается до 20-50 г/дм<sup>3</sup>.

Рифейский водоносный комплекс представлен самыми древними осадочными породами, развитыми в наиболее погруженных участках региона – Крестцовском и Пачелмском прогибах и в наиболее погруженной части Московской синеклизы [8]. Отложения верхнего рифея представлены красноцветными мелко-среднезернистыми кварцевыми песками и песчаниками с подчиненными прослоями алевролитов и аргиллитов. По данным сейсморазведки мощность отложений может достигать 1500-200 м, при этом вскрытая мощность составляет 960 м. Опробование скважин показало наличие рассолов хлоридного натриевого типа с минерализацией от 150-300 г/дм<sup>3</sup> [4, 5].

Водоносный комплекс зоны экзогенной трещиноватости архей-протерозойского фундамента слабо изучен, приурочен к коре выветривания кристаллических пород архейского и протерозойского возраста, а также к трещинно-жильным и пластово-жильным водам. Глубина залегания пород фундамента варьируется от 500 м (на южном крыле Московской синеклизы) до 4000-5500 м в центральной и северной частях региона. Во вскрытой части разреза преобладают гнейсы архейского возраста, к нижнему протерозою относятся разнообразные кварциты, сланцы и метабазиты. Основные породы прорваны многочисленными интрузиями различного состава и возраста, среди которых преобладают гранитоиды. На эрозионной поверхности древних пород повсеместно развита кора выветривания мощностью 10-25 м, обладающая наибольшей водообильностью. В северных районах выделяется белая кора выветривания каолинового типа, развитая по гнейсам, гранито-гнейсам и пегматитовым гнейсам. Красно-бурая кора выветривания развита в центральных районах Московского артезианского бассейна содержит большое количество окислов железа. К этим типам пород приурочены воды, сообщающиеся с рифейским, вендскими и кембрийским водоносными горизонтами. По результатам опробований получены рассолы хлоридного натриевого типа с минерализацией 250-270 г/дм<sup>3</sup> и высоким содержанием брома и йода [4, 5, 7].

### *Заключение*

Проведенный анализ структурно-тектонических особенностей, литологического состава пород и их фильтрационно-емкостных свойств, а также гидрогеохимических особенностей позволил сделать следующие выводы:

1) В пределах Московского артезианского бассейна додевонские осадки развиты неравномерно. Для наиболее погруженной части Московской синеклизы характерен наиболее полный гидрогеологический разрез и наибольшая фациальная выдержанность отложений. Для Воронежской антеклизы характерны сокращённые мощности всех перечисленных комплексов и полное отсутствие ряда водоносных и водоупорных горизонтов, высокая фациальная изменчивость по латерали.

2) Для целей осуществления проектов геологического хранения углекислого газа в пределах Московского артезианского бассейна могут рассматриваться только девонский и вендский водоносные комплексы, в пределах которых развиты соленые воды и рассолы с минерализацией от 20 до 200 г/дм<sup>3</sup>.

3) В окраинных частях бассейна, где водоносные горизонты девонского и вендского комплексов залегают недостаточно глубоко и фиксируются зоны инфильтрационного питания подземных вод захоронение углекислого газа в водоносные горизонты не может быть осуществлено. Питьевое водоснабжение, осуществляемое за счет девонских горизонтов, известно в отдельных районах Липецкой, Тамбовской, Рязанской, Калужской, Тульской, Орловской и Вологодской областей.

### *Благодарности*

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ № FWZZ-2022-0014 и Новосибирского государственного университета по программе Приоритет-2030.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Юрчик И.И., Садыкова Я.В., Деркачев А.С., Черных А.В., Максимова А.А., Головин С.В., Главнов Н.Г., Жуковская Е.А. Региональный прогноз перспектив захоронения углекислого газа на территории Российской Федерации // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 3 – с.36-42.

2. Методические рекомендации по составлению карт гидрогеологического районирования масштаба 1: 2 500 000, схем гидрогеологической стратификации и классификаторов объектов гидрогеологического районирования и стратификацию. – М.: МПР России, 2004. – 29 с.

3. Стратиграфический кодекс России/ под ред. Гинсбург В.И., Толмачева Т.Ю. – СПб: ФГУП ВСЕГЕИ, 2019. – 96 с.

4. Гидрогеология СССР. Т.1. Московская и смежные области. – М.: Недра, 1966. – 423 с.

5. Гидрогеология СССР. Т.4. Воронежская и смежные области. – М.: Недра, 1972. – 499 с.

6. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000. Центрально-Европейская серия. Карта четвертичных образований, лист N37. – СПб: ФГУП ВСЕГЕИ, 2015.

7. Кузьмин А. Н., Кириков В. П., Лукьянова Н. В., Максимов А. В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Центрально-Европейская. Лист N-37 – Москва. Объяснительная записка. – СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. – 462 с.

8. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000. Центрально-Европейская серия. Геологическая карта дочетвертичных образований, лист N37. – СПб: ФГУП ВСЕГЕИ, 2015.

9. Стратиграфическая схема верхнемеловых отложений Восточно-Европейской платформы / под ред. В.А. Прозоровский. – М.: ПИН РАН, 2005. – 203 с.

10. Унифицированная стратиграфические схемы меловых отложений Восточно-Европейской платформы / под ред.: В.В. Митта. – М.: ПИН РАН-ФГУП «ВНИГНИ», 2012. – 64 с
11. Унифицированная региональная стратиграфическая схема юрских отложений Восточно-Европейской платформы/ под ред. В.В. Митта. – М.: ПИН РАН-ФГУП ВНИГНИ, 2012. – 64 с.
12. Решение Межведомственного регионального стратиграфического совещания по среднему и верхнему палеозою Русской платформы (с региональными стратиграфическими схемами). Ленинград, 1988 г. Пермская система/ под ред. В.П. Горский, Е.А. Гусева. – Л.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 1990. – 48 с
13. Решение Межведомственного регионального стратиграфического совещания по среднему и верхнему палеозою Русской платформы (с региональными стратиграфическими схемами). Ленинград, 1988 г. Каменноугольная система. – Л.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 1990. – 40 с.
14. Радионова Г.Д., Умнова В.Т., Кононова Л.И. и др. Девон Воронежской антеклизы и Московской синеклизы. – М.: Росгеолфонд, 1995. – 265 с.
15. Решение Межведомственного регионального стратиграфического совещания по среднему и верхнему палеозою Русской платформы (с региональными стратиграфическими схемами). Ленинград, 1988 г. Девонская система/под ред. М.А. Ржонская, В.Ф. Куликова – Л.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 1990. – 60 с.
16. Стратиграфическая схема вендских отложений Московской синеклизы / под ред. Е.М. Аксенов, С.М. Шик. – М.: Центр. регион. геол. центр, 1996. – 46 с.

© Я. В. Садыкова, 2022