

УДК 556.3.01
DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4743
Шифр специальности ВАК: 1.6.6

Связь химического и изотопного состава природных вод с новейшей тектонической структурой в районе оз. Глубокое (Московская область)

С.А. Глухова¹✉, Н.А. Харитоновна^{1,2}, А.В. Ермаков^{1,3}

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, г. Москва*

² *Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, г. Владивосток*

³ *Геологический институт Российской академии наук, Россия, г. Москва*

✉ koval.sa95@yandex.ru

Аннотация. Актуальность. Установление взаимосвязи между тектоникой и гидрогеологическими условиями является сложной задачей, для решения которой необходимо использовать комплексный подход. В статье рассматриваются геохимические особенности подземных вод, формирующихся на западе Московской области в районе озера Глубокое, приуроченного к так называемой Тростенской впадине. **Целью** работы является выявление изотопно-химических особенностей подземных вод, обусловленных влиянием новейшей тектонической структуры района. **Методы.** Мониторинг химического состава природных вод проводился с использованием метода ионной хроматографии на высокоэффективном ионном жидкостном хроматографе LC-20 и методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре Agilent 7700 x. Содержания стабильных изотопов кислорода ($\delta^{17}\text{O}$ и $\delta^{18}\text{O}$) и водорода (δD) определялись методом лазерной спектроскопии по затуханию света с кольцевой многоходовой кюветой на анализаторе Picarro L2140i. **Результаты и выводы.** Проведенные исследования показали, что подземные воды подольско-мячковского водоносного комплекса в области развития Тростенской впадины характеризуются повышенной минерализацией, а также более высоким содержанием гидрокарбонатов и кальция, по сравнению с подземными водами, распространенными в периферийных частях области исследования. В пределах изучаемой структуры зафиксированы более высокие содержания микрокомпонентов (стронций, барий, скандий, рубидий и др.) Также к Тростенской впадине приурочены подземные воды, характеризующиеся более тяжелым изотопным составом ($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{17}\text{O}$). Данные по отношению $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{17}\text{O}$ в природных водах получены впервые для изучаемой территории. Вероятно, подземные воды в центральной и северо-западной части области исследования имеют более тяжелый сформированный изотопный состав, обусловленный поступлением вод в постледниковый период. Выявленная площадная неоднородность геохимического состава позволила установить влияние Тростенской впадины на формирование химического и изотопного состава подземных вод.

Ключевые слова: изотопный и химический состав, подземные воды, озеро Глубокое, современная тектоническая структура, Московский артезианский бассейн

Благодарности: Выражаем благодарность организациям, предоставившим возможность выполнить отбор проб подземных вод на водозаборах, лабораториям ФГБУН «Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения Российской академии наук» и ФГБУН «Геологический институт Российской академии наук», а также сотрудникам Гидробиологической станции «Глубокое озеро».

Для цитирования: Глухова С.А., Харитоновна Н.А., Ермаков А.В. Связь химического и изотопного состава природных вод с новейшей тектонической структурой в районе оз. Глубокое (Московская область) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 12. – С. 173–183. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4743

UDC 556.3.01

DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4743

Relationship between the chemical and isotopic composition of natural waters and the newest tectonic structure in the area of Lake Glubokoe (Moscow region)

S.A. Glukhova^{1✉}, N.A. Kharitonova^{1,2}, A.V. Ermakov^{1,3}

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

² Far Eastern Geological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

³ Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ koval.sa95@yandex.ru

Abstract. Relevance. The tectonic factor affects the hydrogeological conditions. To assess the tectonics impact on hydrogeological conditions, it is necessary to use an integrated approach. The article considers the hydrogeochemical features of groundwater formed in the area of Lake Glubokoe in the Moscow region, confined to the so-called Trostenskaya depression. **Aim.** To identify the isotope-chemical characteristics of groundwater due to the effect of the latest tectonic structure of the area. **Methods.** The chemical composition of natural waters was monitored using ion chromatography on a high-performance ion liquid chromatograph LC-20 and inductively coupled plasma mass spectrometry on an Agilent 7700 x spectrometer. The contents of stable isotopes of oxygen ($\delta^{17}\text{O}$ and $\delta^{18}\text{O}$) and hydrogen (δD) were determined by laser light attenuation spectroscopy with an annular multi-pass cuvette on a Picarro L2140i analyzer. **Results and conclusions.** The groundwater of the Podolsk-Myachkovsky aquifer complex in the area of development of the Trostenskaya depression is characterized by increased mineralization, as well as a higher content of bicarbonates and calcium, compared to groundwater common in the peripheral parts of the research area. Higher concentrations of micro-components (strontium, barium, scandium, rubidium, etc.) were recorded within the studied structure. Groundwater characterized by a heavier isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{17}\text{O}$) is also confined to the Trostenskaya depression. Data on the ratio of $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{17}\text{O}$ in natural waters were obtained for the first time for the studied area. It is likely that groundwater in the central and northwestern parts of the study area has a heavier formed isotopic composition due to the inflow of water in the postglacial period.

Keywords: isotopic and chemical composition, groundwater, Glubokoe Lake, modern tectonic structure, Moscow Artesian basin

Acknowledgements: We express our gratitude to the organizations that provided the opportunity to conduct groundwater sampling at water intakes, the laboratories of the Far Eastern Geological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences and the Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, as well as the Hydrobiological station «Lake Glubokoe».

For citation: Glukhova S.A., Kharitonova N.A., Ermakov A.V. Relationship between the chemical and isotopic composition of natural waters and the newest tectonic structure in the area of Lake Glubokoe (Moscow region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 12, pp. 173–183. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4743

Введение

Тектонический фактор оказывает влияние на гидрогеологические условия региона. Формирование разломов приводит к изменению фильтрационных свойств водовмещающих и водоупорных отложений, при этом одни разрывные нарушения могут выступать в качестве областей повышенной проницаемости, а другие – играть роль экранов на пути фильтрации подземных вод [1–3]. Установление взаимосвязи между тектоникой и гидрогеологическими условиями является сложной задачей, для решения которой необходимо использовать комплексный подход. Так, например, для анализа

условий формирования подземных вод, приуроченных к антиклинали на юго-западе Франции, была разработана программа, включающая бурение, измерения уровня подземных вод, гидрогеохимический анализ и петрофизические исследования [4].

В данной статье рассмотрены геохимические условия подземных вод, циркулирующих в области развития новейшей тектонической структуры – Тростенской впадины. Предыдущие исследования выявили локальную куполообразную пьезометрическую поверхность подольско-мячковского водоносного комплекса ($\text{C}_2\text{pd-мс}$) на западе Московской области, центральная часть поверхности кото-

рой пространственно совпадает с вытянутой заболоченной впадиной [5]. Результаты морфоструктурного и геолого-структурного анализов показали, что впадина может иметь тектоническое происхождение. Ограничение впадины разрывными нарушениями, S-образная форма, кулисообразное строение и асимметрия бортов указывают на то, что впадина может быть образована в условиях присдвигового раздвига. При помощи метода математического моделирования показано, что формирование куполообразной пьезометрической поверхности возможно только за счет наличия зоны повышенной проницаемости келловей-кимериджского водоупорного комплекса (J_2k -km), отделяющего подольско-мячковский водоносный комплекс (C_2pd -mc) от вышележающих водоносных горизонтов четвертичных отложений (Q_{I-IV}) и волжско-мелового горизонта (J_3v - K_1). Таким образом, установлено, что образование Тростенской впадины могло привести к формированию «гидрогеологического окна», обуславливающего наличие локальной области питания подземных вод.

Определение области питания также возможно на основе изотопного анализа природных вод, который широко используется для решения подобных задач [6–13]. Таким образом, основной целью работы является выявление изотопно-химических особенностей подземных вод, обусловленных влиянием новейшей тектонической структуры района.

Материалы и методы исследования

Мониторинговые исследования природных вод района исследования были проведены в 2022–2023 гг. Всего было отобрано 24 пробы подземных вод подольско-мячковского водоносного комплекса (C_2pd -mc), 12 проб подземных вод четвертичного водоносного комплекса (Q_{I-IV}), 7 проб из поверхностных водных объектов (Рузское и Озернинское вдхр., оз. Глубокое, р. Москва) и 1 проба атмосферных осадков (снег) (рис. 1). Для проб был определен химический (52 компонента) и изотопный ($\delta^{18}O$, δ^2H и $\delta^{17}O$) составы.

Химический анализ был выполнен в Лаборатории аналитической химии ДВГИ ДВО РАН. Определение содержания макрокомпонентов выполнено методом ионной хроматографии на высокоэффективном ионном жидкостном хроматографе LC-20 (Shimadzu, Япония). Определение содержания микрокомпонентов, включая редкоземельные элементы, выполнено методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре Agilent 7700 x (Agilent Techn., США).

Изотопный состав определялся методом лазерной спектроскопии по затуханию света с кольцевой многоходовой кюветой на анализаторе Picarro L2140i в лаборатории теплопереноса ГИН РАН.

Дополнительно для анализа состава природных вод в районе исследования была использована фондовая информация, полученная при проведении геологоразведочных работ с целью оценки запасов подземных вод, а также результаты проведения геолого-экологических исследований и гидрогеологического, инженерно-геологического и геоэкологического картографирования масштаба 1:200000 на территории листов N-37-I, II и O-37-XXXII (Московская и Тверская области РФ), выполненных «Геоцентр-Москва» в 1999 г. На основании результатов гидрогеохимического опробования подземных вод при проведении картографирования была построена карта изменения сухого остатка для объединенного каширско-мячковского (C_2pd -mc+ks) и четвертичного (Q_{I-IV}) водоносных комплексов. Следует отметить, что в пределах района исследования подольско-мячковский (C_2pd -mc) и каширский (C_2ks) водоносные комплексы имеют схожий химический состав подземных вод. Также в пределах данного района в основном эксплуатируется подольско-мячковский водоносный комплекс, что позволяет использовать полученные результаты для характеристики химического состава исследуемого водоносного комплекса.

Результаты исследования и их обсуждения

Макрокомпонентный состав. По результатам гидрогеохимического опробования, а также анализа фондовых материалов, в районе исследования подземные воды подольско-мячковского водоносного комплекса (C_2pd -mc) преимущественно гидрокарбонатные магниево-кальциевые, пресные с минерализацией 441–631 мг/л (табл. 1). Пробы, отобранные в области развития Тростенской впадины характеризуются значениями минерализации 512–631 мг/л при среднем 560 мг/л. Содержание гидрокарбонатов изменяется от 388 до 458 мг/л, при среднем 416 мг/л. Содержание кальция составило 72,8–114,0 мг/л (при среднем 89,2 мг/л), магния – 24,3–35,8 мг/л (при среднем 26,3 мг/л). По направлению движения подземных вод к долине р. Москвы значения минерализации снижаются до 441–502 мг/л, при среднем 469 мг/л. Также отмечаются более низкие значения содержания гидрокарбонатов 315–355 мг/л (при среднем 338 мг/л), кальция от 73,9 до 87,2 мг/л (при среднем 78,3 мг/л) и магния 17,7–22,0 мг/л (среднее – 21,2 мг/л) (рис. 1). В восточном направлении в районе г. Истры минерализация подземных вод составила 494 мг/л, содержание гидрокарбонатов – 354 мг/л и кальция – 64,1 мг/л, что также ниже значений, полученных в области развития структуры. Содержание магния на востоке в количестве 31,6 мг/л несколько выше среднего значения для центральной части впадины. Северо-западнее структуры минерализация под-

земных вод составляет 557–591 мг/л, что близко к значениям в центральной части Тростенской впадины. Содержание гидрокарбонатов в количестве 409–432 мг/л, кальция 90,8–96,2 мг/л и магния 23,1–33,0 мг/л также близко со значениями, полученными в центральной части области развития Тростенской впадины. В юго-восточном направлении в районе г. Звенигорода минерализация подземных вод составила 610 мг/л. Следует отметить, что подземные воды в данной пробе характеризуются гидрокарбонатным кальциево-магниевым составом и отличаются по катионному составу от остальных проб в районе исследования, что, возможно, связано с высоким содержанием доломита в водовмещающих отложениях, на что также указывает высокое содержание магния в количестве 52,9 мг/л [14].

Анализ карты изменения сухого остатка в подземных водах каширско-мячковского (C₂pd-мс+ks)

водоносного комплекса, полученной на основании результатов картографирования масштаба 1:200000 (Отчет о проведении геолого-экологических исследований..., «Геоцентр-Москва», 1999), показывает, что в районе развития Тростенской впадины выделяется область со значениями 424–460 мг/л, при этом севернее и южнее выделяются области с более низкими значениями сухого остатка 280–340 и 262–358 мг/л соответственно. Северо-западнее отмечаются области со значениями сухого остатка 410–496 мг/л, близкие со значениями в центральной части структуры. Восточнее изучаемой структуры, в районе г. Истры, отмечается область со значениями 376–456 мг/л, снижаясь до значения 318 мг/л в районе Истринского вдхр. На юго-востоке района исследования, около г. Звенигорода, отмечено единичное значение 538 мг/л, относительно повышенное по сравнению с центральной частью структуры.

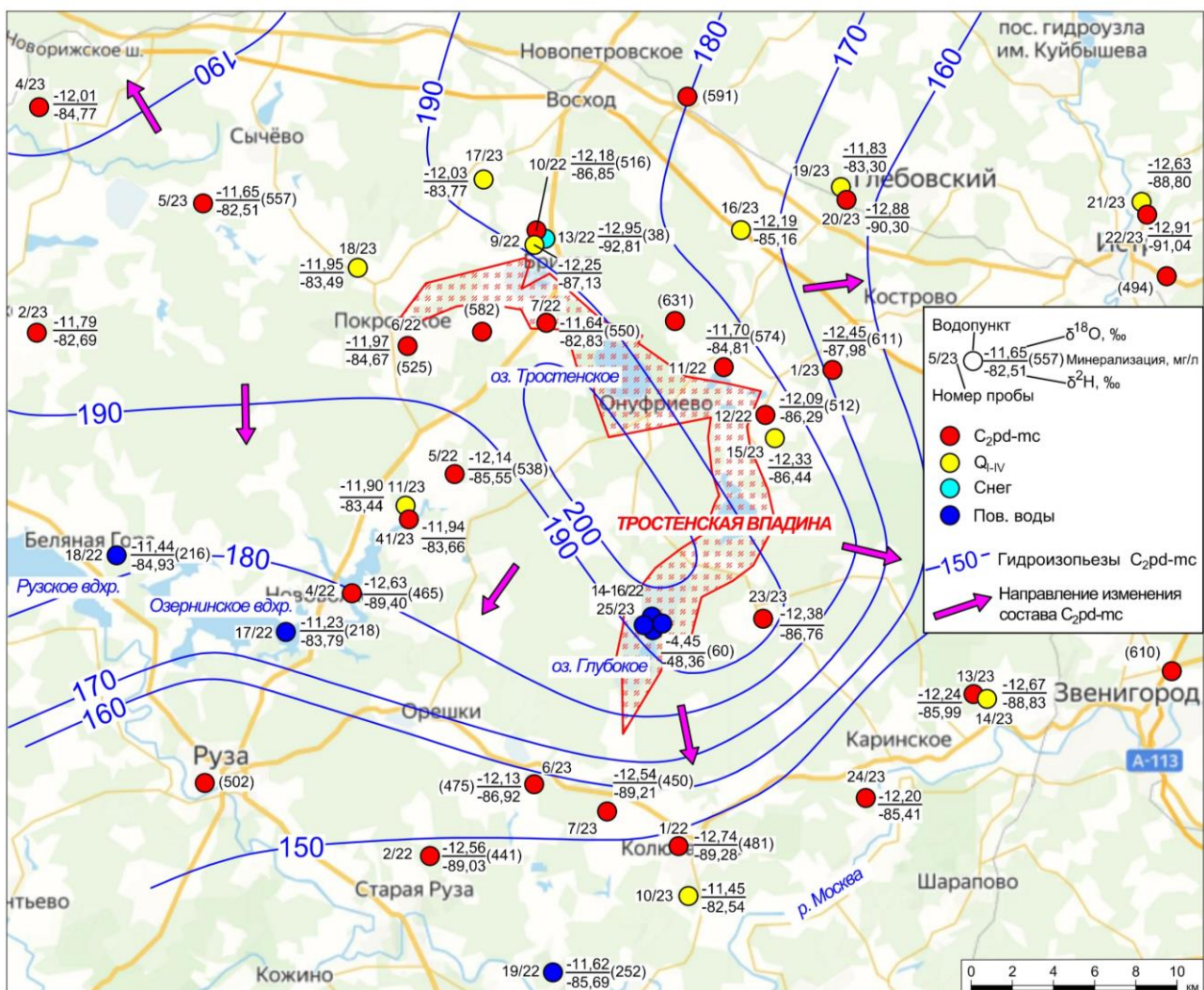


Рис. 1. Схема отбора проб природных вод с результатами опробования
 Fig. 1. Map showing natural water sampling with the results of testing

Таблица 1. Химический состав природных вод в районе Тростенской впадины, мг/л

Table 1. Chemical composition of natural waters in the area of the Trostenskaya depression, mg/l

№ пробы sample no.	Место отбора проб Sampling location	M	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	F ⁻	Li ⁺
<i>Подольско-мячковский водоносный комплекс/Podolsko-Muachkovsky aquifer complex (Czpd-mc)</i>														
1/22	п. Колюбакино Kolyubakino village	481	79,3	21,9	5,9	2,6	355	9,7	2,0	<0,5	4,0	0,3	<0,3	<0,01
2/22	д. Глухово/Glukhovo village	441	74,6	17,7	6,5	1,9	330	3,6	1,0	3,0	2,6	<0,1	<0,3	<0,01
4/22	д. Нововолково Novovolkovo village	465	73,9	21,3	8,3	3,7	345	9,0	1,5	<0,5	0,8	0,5	<0,3	<0,01
5/22	д. Михайловское Mikhailovskoe village	538	82,8	25,2	11,5	3,9	404	7,5	0,9	<0,5	1,9	<0,1	<0,3	<0,01
6/22	с. Покровское Pokrovskoe village	525	83,5	25,0	8,5	3,1	391	10,1	1,3	<0,5	0,8	<0,1	<0,3	<0,01
7/22	с. Никольское Nikolskoe village	550	88,7	24,8	7,5	3,8	415	2,1	1,3	<0,5	6,2	<0,1	<0,3	<0,01
10/22	д. Мамошино Mamoshino village	516	76,8	24,3	12,7	3,8	388	3,3	1,7	<0,5	3,8	0,1	0,8	<0,01
11/22	ЗАО «Мансуровское карьероуправление» CJSC Mansurovskoe karieroуправление	574	96,5	25,2	7,7	3,3	430	<0,1	9,1	2,6	<0,1	<0,1	<0,3	<0,01
12/22	д. Петрово/Petrovo village	512	72,8	26,5	13,1	4,5	389	1,0	3,5	<0,5	<0,1	0,7	<0,3	0,02
-	*ООО «Газпром»/Gazprom LLC	611	87,2	35,8	9,9	5,4	451	16,0	4,3	0,0	0,6	<0,4	0,9	0,03
-	*СНТ «Совет»/SNT «Sovet»	557	96,2	23,1	7,4	2,5	409	14,0	3,2	0,0	0,6	0,5	0,8	0,01
-	*ЗАО «Богаевский карьер» Bogaevsky Quarry CJSC	475	80,0	22,0	4,1	1,7	350	12,0	4,0	<0,01	<1	<0,1	-	0,01
-	*ООО «ОКНСМ»/OKNSM LLC	450	74,8	21,9	6,0	1,4	315	25,1	5,1	0,0	0,3	0,1	0,3	0,01
-	*ООО «РотаК»/RotaK LLC	579	91,0	33,0	5,5	-	409	26,0	13,0	0,0	1,2	-	0,4	0,01
-	*г. Руза/Ruza	502	87,2	22,5	7,8	1,8	336	29,6	16,7	0,1	0,6	0,2	-	0,01
-	*ООО «Белая Руза»/Belaya Ruza LLC	582	100,2	24,3	10,5	3,3	415	19,3	7,1	0,0	1,9	0,5	0,3	0,01
-	*ЗАО «Компания «Нутритек» CJSC Nutritek Company	494	64,1	31,6	8,0	8,4	354	20,0	4,3	<0,02	<2	0,1	1,1	0,05
-	*ФГУП Пансионат «Звенигородский» УД РАН FSUE Pension «Zvenigorodsky» UD RAS	610	71,1	52,9	10,0	2,9	427	27,2	16,5	0,0	2,4	-	0,4	0,01
-	*КП «Приозерье» КР «Priozerye»	631	114,0	26,0	6,6	2,7	458	12,8	9,2	0,0	0,5	0,9	0,3	0,01
-	*ОАО «РЖД» JSC Russian Railways	591	90,8	23,6	18,0	3,0	432	20,0	1,5	<0,02	<0,6	0,6	0,5	-
<i>Поверхностные воды/Surface waters</i>														
13/22	Снег/Snow	38	4,3	0,6	3,3	1,4	21	0,9	2,8	<0,5	1,2	1,0	<0,3	<0,01
14/22	оз. Глубокое/Lake Glubokoe	60	9,0	2,6	1,6	1,1	41	2,7	1,1	<0,5	<0,1	<0,1	<0,3	<0,01
15/22	оз. Глубокое/Lake Glubokoe	63	9,2	2,6	1,9	1,0	41	3,2	1,4	<0,5	1,5	0,1	<0,3	<0,01
16/22	оз. Глубокое/Lake Glubokoe	62	9,1	2,6	2,0	1,1	41	2,9	1,5	<0,5	0,5	0,1	<0,3	<0,01
17/22	Озернинское вдхр. Ozerninskoe reservoir	218	36,1	8,4	6,9	1,8	145	7,4	11,0	<0,5	0,9	<0,1	<0,3	<0,01
18/22	Рузское вдхр. Ruzskoe reservoir	216	34,4	9,1	5,7	2,1	146	6,8	8,0	<0,5	2,4	0,2	<0,3	<0,01
19/22	р. Москва/Moscow River	252	41,1	10,0	8,0	1,8	166	9,7	12,1	<0,5	1,9	0,3	<0,3	<0,01

Примечание/Note: «*» на основании фондовых материалов ФГБУ «Росгеолфонд»/based on the stock materials of the Federal State Budgetary Institution Rosgeolfond.

Анализ карты позволяет выявить закономерности, подобные ранее полученному результату гидрогеохимического опробования и анализа фондовых материалов. Повышенные значения сухого остатка согласуются с положением Тростенской впадины и с ранее полученной куполообразной пьезометрической поверхностью подольско-

мячковского водоносного комплекса в районе исследования (рис. 1).

Таким образом, можно сделать вывод, что по результатам макрокомпонентного анализа подземные воды подольско-мячковского водоносного комплекса в центральной части Тростенской впадины и север-северо-западнее нее характеризуются

относительно повышенной минерализацией и более высоким содержанием гидрокарбонатов и кальция, по сравнению с подземными водами, распространенными в периферийных частях.

Анализ карты изменения сухого остатка в родниках и колодцах, полученной на основании результатов картографирования масштаба 1:200000 (Отчет о проведении геолого-экологических исследований..., «Геоцентр-Москва», 1999) показывает, что значения показателя изменяются от 314 до 986 мг/л. В северной части Тростенской впадины значения сухого остатка изменяются от 440 до 502 мг/л, а в центральной и южной – от 590 до 710 мг/л. Следовательно, формирование более минерализованных подземных вод подольско-мячковского водоносного комплекса в районе структуры по сравнению с периферийной частью возможно за счет перетока подземных вод из вышележающего четвертичного водоносного комплекса через разделяющий келловей-кимериджский водоупорный горизонт.

По результатам опробования поверхностных водных объектов р. Москвы, Озернинского и Рузского вдхр. и оз. Глубокое воды по химическому составу гидрокарбонатные магниево-кальциевые. Однако поверхностные воды р. Москвы, Озернинского и Рузского вдхр. характеризуются минерализацией 215–251 мг/л, а поверхностные воды оз. Глубокое имеют минерализацию 56–62 мг/л, что в свою очередь может свидетельствовать о том, что роль подземного питания при формировании оз. Глубокое значительно ниже, чем в других водных объектах. Вероятно, состав поверхностных вод оз. Глубокое формируется в основном за счет атмосферных осадков. Результаты опробования снега показывают, что по химическому составу воды гидрокарбонатные натриево-кальциевые с минерализацией 37 мг/л.

Микрокомпонентный состав. Анализ содержания микрокомпонентов в подземных водах подольско-мячковского водоносного комплекса показывает, что по ряду компонентов наблюдаются относительно повышенные значения в центральной части района исследования по сравнению с периферией. Так, например, концентрация стронция в центральной части составляет 567–746 мг/л, в северо-западной и южной части отмечаются относительно низкие значения 148–398 мкг/л. Подобные закономерности также отмечаются по скандию, барии, рубидию, цезию, лантану, самарию, европию и гадолинию [14].

Таким образом, можно отметить, что в центральной части района исследования, в области развития Тростенской впадины, и северо-западнее нее отмечаются более высокие содержания микрокомпонентов, чем на прилегающей территории.

Изотопный состав. Результаты анализа изотопного состава показывают, что значение $\delta^{18}\text{O}$ в подземных водах подольско-мячковского водоносного комплекса в пределах области исследования изменяется от $-12,91$ до $-11,64$ ‰. Воды, характеризующиеся более тяжелым изотопным составом, отмечаются в северной части Тростенской впадины (от $-11,64$ до $-11,70$ ‰) и северо-западнее ее (от $-11,65$ до $-11,79$ ‰) (табл. 2, рис. 1, 2) [14].

Значение $\delta^2\text{H}$ в подземных водах подольско-мячковского водоносного комплекса в районе исследования изменяется от $-91,04$ до $-82,51$ ‰. Также подобно распределению величины $\delta^{18}\text{O}$ воды с более тяжелым изотопным составом отмечаются в северной части Тростенской впадины ($-82,83$ ‰) и в северо-западной части района исследования (от $-82,69$ до $-82,51$ ‰).

Благодаря недавним аналитическим достижениям в области измерения малых содержаний изотопа кислорода-17 $\delta^{17}\text{O}$ стал использоваться в качестве нового трассера в исследованиях по региональной гидрологии и поверхностной гидрологии, климата и палеоклиматологии. Небольшие вариации в соотношении $^{17}\text{O}/^{18}\text{O}$ могут быть результатом термодинамического и кинетического фракционирования [15]. Параметр $\Delta^{17}\text{O}$ дает информацию о переносе влаги, а также относительной влажности и скорости ветра в области источника влаги [16]. Этот параметр очень чувствителен к относительной влажности и менее чувствителен к температуре и рэлеевской дистилляции во время переноса влаги и выпадения осадков. Основной сферой применения данного маркера является изучение изменений относительной влажности в области источника влаги. По результатам опробования значения $\delta^{17}\text{O}$ в подземных водах в районе исследования изменяется от $-6,82$ до $-6,13$ ‰, повторяя поведение, отмеченное для $\delta^{18}\text{O}$ (табл. 2, рис. 2).

Можно сделать вывод, что к северной части Тростенской впадины приурочены подземные воды, характеризующиеся более тяжелым изотопным составом ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{17}\text{O}$), чем на прилегающей территории. Облегчение изотопного состава происходит в соответствии с направлением движения подземных вод (на юг к р. Москве и на восток, юго-восток к г. Истре, г. Москве) (рис. 1). Можно предположить, что облегчение изотопного состава на периферии связано с прохладным климатом ледникового периода московского возраста. В то время как в центральной и северо-западной части в постледниковый период происходит поступление подземных вод с более тяжелым изотопным соотношением в области развития Тростенской впадины.

Полученные результаты изотопного состава подземных и поверхностных вод сопоставимы с данными опробования, выполненного на территории центральной части Московского артезианского бассейна.

Таблица 2. Изотопный состав подземных и поверхностных вод в районе исследования, ‰

Table 2. Isotopic composition of groundwater and surface waters in the study area, ‰

№ пробы Sample no.	Место отбора проб/Sampling location	$\delta^{17}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
<i>Поверхностные воды/Surface waters</i>				
13/22	Снег/Snow	-6,81	-12,95	-92,81
14/22	оз. Глубокое/Lake Glubokoe	-2,32	-4,45	-48,36
15/22	оз. Глубокое/Lake Glubokoe	-2,44	-4,65	-49,22
16/22	оз. Глубокое/Lake Glubokoe	-2,33	-4,44	-48,18
25/23	оз. Глубокое/Lake Glubokoe	-2,37	-4,50	-48,83
17/22	Озернинское вдхр./Ozerninskoe reservoir	-5,92	-11,23	-83,79
18/22	Рузское вдхр./Ruzskoe reservoir	-6,02	-11,44	-84,93
19/22	р. Москва/Moscow River	-6,10	-11,62	-85,69
<i>Четвертичный водоносный комплекс/Quaternary aquifer complex (Q_{I-IV})</i>				
9/22	д. Мамошино/Mamoshino village	-6,46	-12,25	-87,13
10/23	д. Крюково/Kryukovo village	-6,01	-11,45	-82,54
11/23	д. Старо/Staro village	-6,24	-11,90	-83,44
14/23	СНТ «Лесной поселок»/SNT «Lesnoy poselok»	-6,68	-12,67	-88,83
15/23	СНТ «Каскад Плюс»/SNT «Cascade Plus»	-6,49	-12,33	-86,44
16/23	п. Хуторки/Khytorki village	-6,41	-12,19	-85,16
17/23	с. Рождествено/Rozhdestveno village	-6,32	-12,03	-83,77
18/23	д. Ивойлово/Ivoylovo village	-6,29	-11,95	-83,49
19/23	СНТ «Осинки»/SNT «Osinki»	-6,23	-11,83	-83,30
21/23	д. Андреевское (го. Истра)/Andreevskoe village (Istra)	-6,66	-12,63	-88,80
<i>Подольско-мячковский водоносный комплекс/Podolsko-Myachkovsky aquifer complex (C_{zpd}-mc)</i>				
1/22	п. Колюбакино/Kolyubakino village	-6,75	-12,74	-89,28
2/22	д. Глухово/Glukhovo village	-6,63	-12,56	-89,03
4/22	д. Нововолково/Novovolkovo village	-6,66	-12,63	-89,40
5/22	д. Михайловское/Mikhailovskoe village	-6,44	-12,14	-85,55
6/22	с. Покровское/Pokrovskoe village	-6,30	-11,97	-84,67
7/22	с. Никольское/Nikolskoe village	-6,13	-11,64	-82,83
10/22	д. Мамошино/Mamoshino village	-6,41	-12,18	-86,85
11/22	ЗАО «Мансуровское карьероуправление» CJSC Mansurovskoe karieroypravlenie	-6,14	-11,70	-84,81
12/22	д. Петрово/Petrovo village	-6,35	-12,09	-86,29
1/23	ООО «Газпром»/Gazprom LLC	-6,55	-12,45	-87,98
2/23	д. Судниково/Sudnikovo village	-6,20	-11,79	-82,69
4/23	д. Нелидово/Nelidovo village	-6,31	-12,01	-84,77
5/23	СНТ «Совет»/SNT «Sovet»	-6,13	-11,65	-82,51
6/23	ЗАО «Богаевский карьер»/Bogaevsky Quarry CJSC	-6,39	-12,13	-86,92
7/23	ООО «ОКНСМ»/OKNSM LLC	-6,58	-12,54	-89,21
13/23	СНТ «Лесной поселок»/SNT «Lesnoy poselok»	-6,47	-12,24	-85,99
20/23	СНТ «Осинки»/SNT «Osinki»	-6,78	-12,88	-90,30
22/23	д. Андреевское (го. Истра)/Andreevskoe village (Istra)	-6,82	-12,91	-91,04
23/23	с. Андреевское/Andreevskoe village	-6,53	-12,38	-86,76
24/23	д. Улитино/Ulitino village	-6,44	-12,20	-85,41
41/23	д. Старо/Staro village	-6,31	-11,94	-83,66

Так, в районе Звенигородской биологической станции им. С.Н. Скадовского, расположенной в юго-восточной части области исследования, значение $\delta^{18}\text{O}$ для грунтовых, напорных вод и вод р. Москвы изменяется от -13 до -11 ‰, для $\delta^2\text{H}$ – от -90 до -83 ‰ [17]. По результатам опробования на участке в районе г. Кашина (Тверская область), на расстоянии около 180 км северо-восточнее Тростенской впадины, значение $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в подземных водах четвертичного водоносного горизонта составило -81 и -11,3 ‰ соответственно. В средне- и верхнекаменноугольных отложениях, опробованных до глубины 168 м, содержание $\delta^2\text{H}$ изменяется от -81 до -92 ‰, $\delta^{18}\text{O}$ – от -11,5 до -12,0 ‰ [18].

Для четвертичного водоносного комплекса (Q_{I-IV}) по результатам опробования значение $\delta^{18}\text{O}$ изменяется от -12,67 до -11,45 ‰, $\delta^2\text{H}$ – от -88,83 до -82,54 ‰ и $\delta^{17}\text{O}$ – от -6,68 до -6,01 ‰. Для поверхностных водных объектов (Озернинское вдхр., Рузское вдхр., р. Москва) отношение $\delta^{18}\text{O}$ изменяется от -11,62 до -11,23 ‰, $\delta^2\text{H}$ – от -85,69 до -83,79 ‰ и $\delta^{17}\text{O}$ – от -6,10 до -5,92 ‰. По результатам анализа пробы снега отношение $\delta^{18}\text{O}$ от -12,95 ‰, $\delta^2\text{H}$ -92,81 и $\delta^{17}\text{O}$ составило -6,81 ‰ (табл. 2, рис. 2).

Уравнение линии тренда, полученное для четвертичного водоносного комплекса в районе Тростенской впадины, имеет вид $\delta^2\text{H}=7,29*\delta^{18}\text{O}+3,3$ (рис. 2).

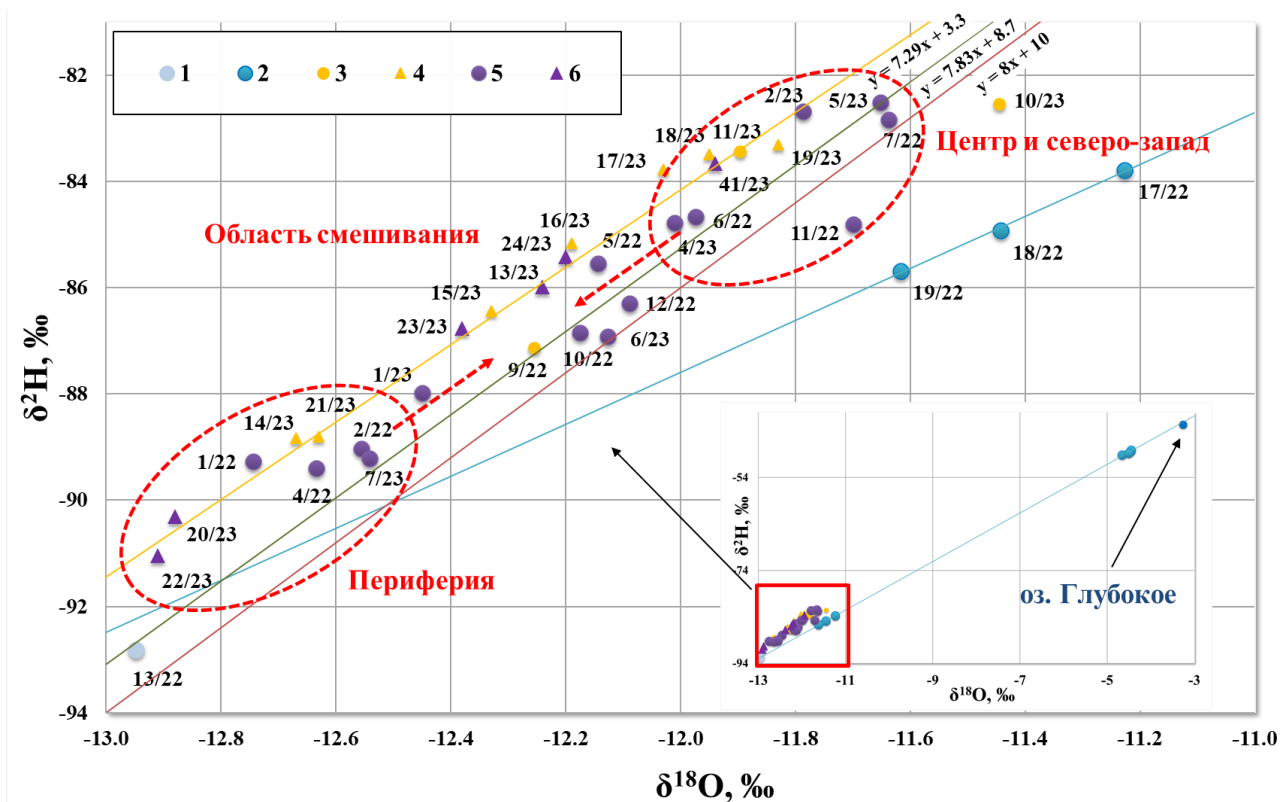


Рис. 2. График зависимости $\delta^2\text{H}$ от $\delta^{18}\text{O}$ в природных водах района исследования [14]: 1 – снег; 2 – поверхностные воды; 3 – четвертичный водоносный комплекс, опробованный в марте 2022 и 2023 гг.; 4 – четвертичный водоносный комплекс, опробованный в июне 2023 г.; 5 – подольско-мячковский водоносный комплекс, опробованный в марте 2022 и 2023 гг.; 6 – подольско-мячковский водоносный комплекс, опробованный в июне 2023 г.

Fig. 2. Graph of the dependence of $\delta^2\text{H}$ on $\delta^{18}\text{O}$ in the natural waters of the study area [14]: 1 – snow; 2 – surface waters; 3 – quaternary aquifer tested in March 2022 and 2023; 4 – quaternary aquifer tested in June 2023; 5 – Podolsk-Myachkovskiy aquifer tested in March 2022 and 2023; 6 – Podolsk-Myachkovskiy aquifer complex tested in June 2023

По данным [19] локальная линия метеорных вод для осадков в г. Москве в 2017–2018 гг. (для всех исследуемых образцов) имеет вид $\delta^2\text{H}=7,83*\delta^{18}\text{O}+8,7$. Результаты анализа атмосферных осадков в г. Москве за 2005–2014 гг. описываются соотношением $\delta^2\text{H}=6,93*\delta^{18}\text{O}+11,3$ [20].

В центральной части района исследования в пробе № 41/23 ($\text{C}_{2\text{pd-мс}}$), отобранной в д. Старо, значение $\delta^{18}\text{O}$ составляет $-11,94$ ‰, а в пробе № 11/23 ($\text{Q}_{\text{I-IV}}$) $-11,90$ ‰. Северо-западнее исследуемой структуры содержание $\delta^{18}\text{O}$ в пробе № 6/22 ($\text{C}_{2\text{pd-мс}}$) составляет $-11,97$ ‰, а пробе № 18/23 ($\text{Q}_{\text{I-IV}}$) $-11,95$ ‰. В пределах «области смешивания», изображенной на рис. 2, в пробе № 10/22 значение $\delta^{18}\text{O}$ составляет $-12,18$ ‰, а пробе № 9/22 ($\text{Q}_{\text{I-IV}}$) $-12,25$ ‰. В пробе № 12/22 ($\text{C}_{2\text{pd-мс}}$) значение $\delta^{18}\text{O}$ составляет $-12,09$ ‰, а пробе № 15/23 ($\text{Q}_{\text{I-IV}}$) $-12,33$ ‰. Восточнее в районе г. Истры в пробе № 22/23 ($\text{C}_{2\text{pd-мс}}$) содержание $\delta^{18}\text{O}$ составляет $-12,91$ ‰, а пробе № 21/23 ($\text{Q}_{\text{I-IV}}$) $-12,63$ ‰ (табл. 2, рис. 2). Наибольшая разница в изотопном составе подземных вод между подольско-мячковским и четвертичным водоносным комплек-

сом отмечается в периферийной части области исследования и составляет $0,28$ ‰, а близкий состав – в районе развития Тростенской впадины и северо-западнее нее ($0,02$ – $0,04$ ‰).

При проведении исследования [5] был рассмотрен вопрос о генезисе оз. Глубокое и его возможной приуроченности к тектонической структуре. Выдвинуто предположение, что озеро, помимо ледникового происхождения, может иметь также и тектоническое.

По результатам анализа поверхностных вод озера его изотопный состав весьма отличается от состава других поверхностных водных объектов, опробованных в пределах района исследования (р. Москва, Рузское и Озернинское вдхр.). Значение $\delta^{18}\text{O}$ изменяется от $-4,65$ до $-4,44$ ‰, $\delta^2\text{H}$ – от $-49,22$ до $-48,18$ ‰ и $\delta^{17}\text{O}$ – от $-2,44$ до $-2,32$ ‰. Изотопный состав поверхностных вод оз. Глубокое аналогичен по отношению $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ составу атмосферных осадков летнего периода, что свидетельствует о преимущественном летнем питании озера [21]. При этом сопоставление результатов опробования оз. Глубокое с результатами опробования оз.

Белое карстового происхождения, расположенного в Рязанской области, показывает идентичный изотопный состав. Сочетание таких признаков, как большая глубина озера (до 32 м), воронкообразная форма и преимущественное питание атмосферными осадками, позволяют предположить, что оз. Глубокое по происхождению может быть отнесено к карстовому типу. Преимущественное питание озера за счет атмосферных осадков подтверждается также результатами измерения электропроводности по глубине озера [22]. Так, за период наблюдений с 2017 по 2018 гг. электропроводность воды изменялась от 86 до 99 мкСм/см в основной толще воды и до 121 мкСм/см у дна, что свидетельствует о низкой величине питания озера за счет подземных вод. Наличие карстового процесса является признаком как современной активности исследуемой тектонической структуры, так и возможных условий ее формирования – присдвигового раздвига.

Заключение

По результатам выполненного анализа подземные воды подольско-мячковского водоносного комплекса в области развития Тростенской впадины характеризуются повышенной минерализацией (512–631 мг/л), а также более высоким содержанием гидрокарбонатов (388–458 мг/л) и кальция (72,8–114,0 мг/л), по сравнению с подземными водами, распространенными в периферийных частях области исследования. В пределах изучаемой структуры зафиксированы более высокие содержания стронция, бария, серы, скандия, рубидия, це-

зия, лантана, самария и европия, чем на прилегающей территории.

К Тростенской впадине приурочены подземные воды, характеризующиеся более тяжелым изотопным составом ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{17}\text{O}$). Так, значение $\delta^{18}\text{O}$ составило от $-11,64$ до $-11,70$ ‰, $\delta^2\text{H}$ $-82,83$ ‰ и $\delta^{17}\text{O}$ – от $-6,13$ до $-6,14$ ‰. Облегчение изотопного состава происходит в соответствии с направлением движения подземных вод (на юг к р. Москве и на восток, юго-восток к г. Истре, г. Москве). Вероятно, облегчение изотопного состава на периферии связано с прохладным климатом ледникового периода московского возраста. В центральной и северо-западной части в постледниковый период происходит поступление подземных вод с более тяжелым изотопным составом. Наибольшая разница в изотопном составе подземных вод между подольско-мячковским и четверичным водоносным комплексом отмечается в периферийной части области исследования и составляет $0,28$ ‰, а близкий состав – в районе развития Тростенской впадины и северо-западнее нее ($0,02$ – $0,04$ ‰).

Таким образом, выявленная площадная неоднородность гидрогеохимического состава позволила установить влияние Тростенской впадины на формирование химического состава подземных вод в районе исследования.

Схожесть химического состава подземных вод подольско-мячковского водоносного комплекса, распространенных северо-западнее структуры, с составом вод в ее центральной части указывает на возможное развитие исследуемой структуры в северо-западном направлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крапивнер Р.Б., Плугина Т.А., Язвин А.Л. Роль разломов в формировании фильтрационных неоднородностей верхнего гидрогеологического этажа // Разведка и охрана недр. – 2003. – № 10. – С. 18–21.
2. Constraining fault-zone hydrogeology through integrated hydrological and geoelectrical analysis / L.B. Ball, S. Ge, J.S. et Caine al. // Hydrogeol. – 2010. – Vol. 18. – P. 1057–1067. DOI: 10.1007/s10040-010-0587-z.
3. Fault zone hydrogeology / V.F. Bense, T., Gleeson S.E. Loveless, O. Bour, J. Scibek // Earth-Science Reviews. – 2013. – Vol. 127. – P. 171–192.
4. Influence of an anticline structure on hydrogeological functioning and aquifer interactions in a multilayered aquifer system: the case of Villagrains-Landiras anticline (Gironde, France) / C. Labat, F. Larroque, B. de Grissac et al. // Hydrogeol. – 2021. – Vol. 29. – P. 1711–1732.
5. Глухова С.А., Пинигин О.В., Расторгуев А.В. Роль присдвиговых структур растяжения в субвертикальной фильтрации водонапорной системы Московского артезианского бассейна // Вестн. Моск. ун-та. – 2023. – Сер. 4. – № 1. – С. 97–109. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-1-97-109.
6. Лепокурова О.Е., Дребот В.В. Изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) подземных вод территории Торейских озер (Восточное Забайкалье) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 20–29.
7. Исследование подземных вод в отдельных районах Карелии изотопно-геохимическими методами / И.В. Токарев, Г.С. Бородулина, Е.П. Каюкова, В.А. Поляков, Ю.В. Варнакова, С.В. Жданов, Т.В. Маркова // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2008. – Сер. 7. – № 2. – С. 25–36.
8. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. – М.: Научный мир, 2009. – 632 с.
9. Фор Г. Основы изотопной геологии. – М.: Мир, 1989. – 590 с.
10. Environmental isotopes in the hydrological cycle: principles and applications / W.G. Mook, J.R. Gat, H.A. Meijer, K. Rózański, K.J. Froehlich // Unesco. Programa Hidrológico Internacional and Agencia Internacional de Energía Atómica. – Paris, 2001. – P. 117.
11. Kendall C., McDonnell J.J. Isotope tracers in catchment hydrology. – Amsterdam: Elsevier, 1998. – 839 p.

12. Karst recharge areas identified by combined application of isotopes and hydrogeological budget / S. Iacurto, G. Grelle, F.M. de Filippi, G. Sappa // *Water*. – 2021. DOI: 10.3390/w13141965.
13. Stable isotope evidence on mechanisms and sources of groundwater recharge in quaternary aquifers of Kelantan / M.M.A. Malaysia Khan, K. Raj, A.A.E. Rak et al. // *Arab J Geosci*. – 2021. – Vol. 14. – P. 1–11.
14. Глухова С.А., Харитоновна Н.А. Изотопно-химический состав подземных вод в районе развития новейшей тектонической структуры (Московская область) // *Сергеевские чтения*. – М.: Геоинфо, 2024. – Вып. 25. – С. 139–141.
15. Angert A., Sappa C.D., DePaolo D.J. Kinetic ^{17}O effects in the hydrologic cycle: indirect evidence and implications // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2004. – Vol. 68. – P. 3487–3495.
16. Vreča P., Kern Z. Use of water isotopes in hydrological processes // *Water*. – 2020. – Vol. 12. – 2227.
17. Ермаков А.В. Изотопный состав подземных и поверхностных вод района Звенигородской практики // *Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования: Труды Всероссийской научной конференции с международным участием*. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2023. – С. 292–297.
18. О генезисе глубоких подземных вод Московского артезианского бассейна по изотопным данным / Ю.Б. Селецкий, С.Ф. Абрамсон, А.В. Якубовский, Н.В. Исаев // *Исследование природных вод изотопными методами*. – М.: Наука, 1981. – С. 14–25.
19. Stable isotope composition of precipitation events revealed modern climate variability / Y. Vasil'chuk, J. Chizhova, N. Budantseva, Y. Vystavna // *Theor Appl Climatol*. – 2022. – Vol. 147. – № 3–4. – P. 1649–1661.
20. Zysin N.N., Tokarev I.V., Vinograd N.A. Monitoring of stable isotopes ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) in precipitations of Moscow (Russia): comparison for 2005–2014 and 1970–1979 periods // *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. – 2021. – Vol. 66. – № 4. – P. 723–733.
21. WaterIsotopes.org. URL: https://wateriso.utah.edu/waterisotopes/pages/data_access/form_3_1.html (дата обращения 15.01.2024).
22. Современный гидроэкологический режим озера Глубокого / Д.И. Соколов, О.Н. Ерина, М.А. Терёшина, Е.Н. Вилимович // *Труды II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития»*. – СПб: Химиздат, 2018. – С. 590–593.

Информация об авторах

Светлана Алексеевна Глухова, аспирант, инженер кафедры гидрогеологии геологического факультета, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1; koval.sa95@yandex.ru

Наталья Александровна Харитоновна, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры гидрогеологии геологического факультета, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1; Главный научный сотрудник, Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, 690022, г. Владивосток, пр. 100 летия Владивостока, 159. tchenat@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0855-3385>

Александр Валерьевич Ермаков, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории теплопереноса, Геологический институт Российской академии наук, Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 1; Ведущий специалист кафедры гидрогеологии геологического факультета Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1; a.v.ermakov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8125-1789>

Поступила в редакцию: 21.06.2024

Поступила после рецензирования: 02.07.2024

Принята к публикации: 11.11.2024

REFERENCES

1. Krapivner R.B., Plugina T.A., Yazvin A.L. The role of faults in the formation of filtration heterogeneity of the upper hydrogeological part. *Exploration and protection of the subsoil*, 2003, no. 10, pp. 18–21. (In Russ.).
2. Ball L.B., Ge S., Caine J.S. Constraining fault-zone hydrogeology through integrated hydrological and geoelectrical analysis. *Hydrogeol*, 2010, vol. 18, pp. 1057–1067. DOI: 10.1007/s10040-010-0587-z.
3. Bense V.F., Gleeson T., Loveless S.E., Bour O., Scibek J. Fault zone hydrogeology. *Earth-Science Reviews*, 2013, vol. 127, pp. 171–192.
4. Labat C., Larroque F., De Grissac B. Influence of an anticline structure on hydrogeological functioning and aquifer interactions in a multilayered aquifer system: the case of Villagrains-Landiras anticline (Gironde, France). *Hydrogeol*, 2021, vol. 29, pp. 1711–1732.
5. Glukhova S.A., Pinigin O.V., Rastorguev A.V. The role of shear tension structures in subvertical filtration of the water drive system of the Moscow artesian basin. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*, 2023, no. 1, pp. 97–109. (In Russ.) DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-1-97-109.
6. Lepokurova O.E., Drebot V.V. Isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) of groundwater in the territory of the Toreiskie Lakes (Vostochnoe Zabaykalye). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 20–29. (In Russ.).

7. Tokarev I.V., Borodulina G.S., Kayukova E.P., Polyakov V.A., Varnakova Yu.V., Zhdanov S.V., Markova T.V. Investigation of groundwater in certain areas of Karelia by isotope-geochemical methods. *Bulletin of St. Petersburg University*, 2008, ser. 7, no. 2. pp. 25–36. (In Russ.).
8. Ferronsky V.I., Polyakov V.A. *Isotopy of the Earth's hydrosphere*. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2009. 632 p.
9. For G. *Fundamentals of isotope geology*. Moscow, Mir Publ., 1989. 590 p.
10. Mook W.G., Gat J.R., Meijer H.A., Róžański K., Froehlich K.J. Environmental isotopes in the hydrological cycle: principles and applications *Unesco. Programa Hidrológico Internacional and Agencia Internacional de Energía Atómica*. Paris, 2001. p. 117.
11. Kendall C., McDonnell J.J. *Isotope tracers in catchment hydrology*. Amsterdam, Elsevier, 1998. 839 p.
12. Iacurto S., Grelle G., De Filippi F.M., Sappa G. Karst recharge areas identified by combined application of isotopes and hydrogeological budget. *Water*, 2021. DOI: 10.3390/w13141965.
13. Malaysia Khan M.M.A., Raj K., Rak A.A.E. Stable isotope evidence on mechanisms and sources of groundwater recharge in quaternary aquifers of Kelantan. *Arab Geosci*, 2021, vol. 14, pp. 1–11.
14. Glukhova S.A., Kharitonova N.A. Isotope-chemical composition of groundwater in the area of the development of the newest tectonic structure (Moscow region). *Sergeevsky readings*. Moscow, Geoinfo Publ., 2024. Iss. 25, pp. 139–141. (In Russ.)
15. Angert A., Cappa C.D., DePaolo D.J. Kinetic ^{17}O effects in the hydrologic cycle: Indirect evidence and implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, vol. 68, pp. 3487–3495.
16. Vreča P., Kern Z. Use of water isotopes in hydrological processes. *Water*, 2020, vol. 12, 2227.
17. Ermakov A.V. Isotopic composition of groundwater and surface waters of the Zvenigorod practice area. *Modern hydrogeology: topical issues of science, practice and education: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with International participation*. Moscow, Lomonosov Moscow State University Press, 2023. pp. 292–297. (In Russ.).
18. Seletsky Yu.B., Abramson S.F., Yakubovsky A.V., Isaev N.V. On the genesis of deep groundwater in the Moscow Artesian basin according to isotopic data. *Investigation of natural waters by isotopic methods*. Moscow, Nauka Publ., 1981. pp. 14–25. (In Russ.)
19. Vasil'chuk Y., Chizhova J., Budantseva N., Vystavna Y. Stable isotope composition of precipitation events revealed modern climate variability. *Theor Appl Climatol*, 2022, vol. 147, no. 3–4, pp. 1649–1661.
20. Zykin N.N., Tokarev I.V., Vinograd N.A. Monitoring of stable isotopes ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) in precipitations of Moscow (Russia): comparison for 2005–2014 and 1970–1979 periods. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2021, vol. 66, no. 4, pp. 723–733.
21. *WaterIsotopes.org*. Available at: https://wateriso.utah.edu/waterisotopes/pages/data_access/form_3_1.html (accessed 15 January 2024).
22. Sokolov D.I., Erin O.N., Tereshina M.A., Vilimovich E.N. Modern hydroecological regime of Lake Glubokoe. *Proceedings of the II All-Russian Conference «Hydrometeorology and Ecology: achievements and development prospects»*. St Petersburg, Khimizdat Publ., 2018. pp. 590–593. (In Russ.)

Information about the authors

Svetlana A. Glukhova, Postgraduate Student, Engineer, Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation; koval.sa95@yandex.ru

Natalia A. Kharitonova, Dr. Sc., Professor, Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation; Chief Scientific Officer, Far Eastern Geological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 159, 100-letya Vladivostoka avenue, Vladivostok, 690022, Russian Federation. tchenat@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0855-3385>

Alexander V. Ermakov, Cand. Sc., Researcher, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, 7, bld. 1, Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russian Federation; Leading Specialist, Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation. a.v.ermakov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8125-1789>

Received: 21.06.2024

Revised: 02.07.2024

Accepted: 11.11.2024