

**Изменения химического состава грунтовых вод вокруг
Иваньковского водохранилища за 20 лет***Е.Е. Лапина*, В.В. Кудряшова, Л.Э. Лапина*ФГБУН Институт водных проблем РАН,
Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3*Адрес для переписки: *khelena1974@mail.ru*

Реферат. Уже в конце прошлого века появились прогнозы климатологических изменений, в наибольшей степени учитывающие возрастание температур и осадков. В последние десятилетия влияние климатических изменений на режимные характеристики грунтовых вод доказано многими исследователями. Поскольку Иваньковское водохранилище – это основной питьевой источник Московского мегаполиса стратегического значения, выявление признаков трансформации химического состава вод, непосредственно питающих водохранилище, становится необходимым.

С этой целью обобщены и проанализированы результаты зимних и летних гидрохимических площадных съемок грунтовых вод вокруг водохранилища, проведенных авторами в 1999 и 2019 годах. Обследованы воды колодцев и родников в количестве от 98 до 130 объектов. Статистически установлено, что независимо от сезона за 20 лет произошло снижение медианных значений концентраций почти всех компонентов солевого состава (в наибольшей степени сульфатов – на 50%) и биогенных веществ (на 15-85%) грунтовых вод. Медианные значения общей минерализации снизились на 13% летом и 17% зимой, цветности – на 40 и 75% соответственно. Наибольшее снижение концентраций компонентов химического состава грунтовых вод приурочено к холодному периоду. Одновременно в теплый период наблюдается рост медианных и средних значений содержания иона Mg^{2+} (на 15%) и средних значений концентраций фосфора (на 49%).

Значительное снижение общей минерализации и цветности в холодный период, скорее всего, обусловлено разбавлением грунтовых вод талыми во время оттепелей. В то же время резкое снижение медианных значений содержаний сульфатов и нитратов связано с упадком сельского хозяйства и промышленности в регионе, что доказано нашими предыдущими исследованиями. Следовательно, наблюдаемая трансформация химического состава грунтовых вод является многофакторным процессом. Методом исключения установлено, что наиболее вероятной причиной увеличения содержания магния являются атмосферные осадки, а фосфора – зафосфачивание почвенного покрова.

Ключевые слова. Иваньковское водохранилище, грунтовые воды, химический состав, магний, фосфор, снеготаяние, зафосфачивание почв.

Changes in the chemical composition of groundwater around the Ivankovo reservoir over 20 years

E.E. Lapina, V.V. Kudryashova, L.E. Lapina*

Moscow, Water Problems Institute RAS,
3, Gubkina str., 119333, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: *khelena1974@mail.ru*

Abstract. Already at the end of the last century, forecasts of climatological changes appeared, taking into account the increase in temperatures and precipitation to the greatest extent. In recent decades, the impact of climate change on the regime characteristics of groundwater has been proven by many researchers. Since the Ivankovo reservoir is the main drinking source of the Moscow metropolis of strategic importance, it becomes necessary to identify signs of the transformation of the chemical composition of the waters directly feeding the reservoir.

For this purpose, the results of winter and summer hydrochemical areal surveys of groundwater around the reservoir, conducted by the authors in 1999 and 2019, are summarized and analyzed. The waters of wells and springs were examined in the amount from 98 to 130 objects. It has been statistically established that, regardless of the season, over 20 years there has been a decrease in the median values of the concentrations of almost all components of the salt composition (mostly sulfates – by 50%) and nutrients (by 15-85%) of groundwater. The median values of total mineralization decreased by 13% in summer and 17 % in winter, and color values decreased by 40 and 75%, respectively. The greatest decrease in the concentrations of the components of the chemical composition of groundwater is confined to the cold period. At the same time, during the warm period, there is an increase in the median and average values of the content of the Mg^{2+} ion (by 15 %) and the average values of phosphorus concentrations (by 49 %).

A significant decrease in the total mineralization and color in the cold period is most likely due to the dilution of groundwater with melt water during thaws. At the same time, a sharp decrease in the median values of sulfates and nitrates is associated with the decline of agriculture and industry in the region, as proven by our previous studies. Therefore, the observed transformation of the chemical composition of groundwater is a multifactorial process. By the method of exclusion, it was found that the most likely cause of an increase in the content of magnesium is precipitation, while the reason of phosphorus content increase is the phosphating of the soil cover.

Keywords. Ivankovo reservoir, groundwater, chemical composition, magnesium, phosphorus, snowmelt, soil phosphating.

Введение

Химический состав – одна из главных характеристик грунтовых вод. Авторами установлено, что с 1999 г. по 2019 г. (20 лет) на примыкающей к Ивановскому водохранилищу территории произошла замена преобладающего катионного состава грунтовых вод с $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ на $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ (Лапина, Кудряшова, 2021; Lapina et al., 2021). Класс грунтовых вод пока стабилен, но в катионном ряду произошло увеличение содержания доли ионов магния (Mg^{2+}).

Объектом исследований стали грунтовые воды, питающие Ивановское водохранилище – основной источник питьевого водоснабжения Москвы. Цель работы – количественная оценка изменений химического состава грунтовых вод за 20 лет (1999-2019 гг.) и выявление их причин. В начале создания Ивановское водохранилище имело статус мезотрофного. В зависимости от используемого критерия оценки сейчас оно считается «переходным к эвтрофному» или «эвтрофным» (Корнева, 2015). Трофность водоема зависит от соотношения в воде азота (N) и фосфора (P). Особую тревогу вызывает P, о росте которого в окружающей среде региона сообщают многие авторы (Мотузова и др., 2010; Шилькрот, 2015). Таким образом, основными задачами работы стало подтверждение роста концентраций Mg^{2+} и статистический анализ динамики содержания биогенных веществ в грунтовых водах за 20 лет.

Методы и материалы

В работе применены методы статистического анализа и полевых исследований. В основу легли собственные данные площадных съемок химического состава вод колодцев и родников. Съемки проведены в зимнюю и летнюю межень 1999-2000 (98 объектов) и 2018-2019 гг. (130 объектов) вокруг Ивановского водохранилища, на территории Конаковского и в восточной части Калининского районов (рис. 1, 2). Пробы воды отбирали в соответствии с ГОСТ 31612012, 2012).

Химические анализы выполнены в лаборатории филиала Института водных проблем РАН – Ивановской научно-исследовательской станции, расположенной в г. Конаково. Ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} определены титриметрическим (с трилоном Б) методом, цветность – колориметрическим по Pt-Co шкале, Cl^- – аргентометрическим, SO_4^{2-} – турбидиметрическим с BaCl_2 , Na^+ и K^+ – потенциометрическими методами. Концентрации NH_4^+ определены с реактивом Несслера, NO_3^- – с салицилатом натрия, $\text{P}_{\text{общ}}$ и PO_4^{3-} – с аскорбиновой кислотой (Новиков и др., 1990).

I этап – проверили данные, из анализа исключили пробы, отобранные из глубоких колодцев и с экстремальными значениями хлоридов и сульфатов.

II этап – разбили данные по принципу локализации колодцев на правый и левый берег (в силу разной антропогенной нагрузки берегов), применили метод главных компонент.

III этап – выбрали данные по одним и тем же колодцам с целью подтверждения полученных выводов и для устранения влияния особенностей геологического строения и степени нагрузки из разных временных периодов (Lapina et al., 2021). Для уточнения тенденций использовали данные многолетних режимных наблюдений за химическим составом вод опорных объектов.



Рисунок 1. Отбор проб из колодца в д. Окулово, 2019 г.
(исполнители – Е.Е. Лапина и В.В. Кудряшова)

Figure 1. Sampling from a well, Okulovo village, 2019
(samplers – E.E. Lapina and V.V. Kudryashova)



Рисунок 2. Режимный родник в реликтовом сосновом бору, 2019 г.

Figure 2. Regime spring in a relict pine forest, 2019 year

Природные условия

Водохранилище создано в 1937 г. на отрезке Волги от Твери до Дубны. Климат здесь умеренно-континентальный, средняя температура самого теплого месяца $+18.1^{\circ}\text{C}$, холодного – -7.2°C ; за последние 30 лет в зимние месяцы на 0.04°C в год растет температура воздуха (Лапина, Григорьева, 2020). Годовая сумма осадков варьирует от 550 до 700 мм. В тектоническом отношении район приурочен к северо-западной части Московского артезианского бассейна. Почвы – дерновые разной степени оподзоленности, зона аэрации выполнена песками и моренными суглинками. Доля подземного притока в реки от среднееголетнего стока в устье составляет в среднем 32% (Иваньковское..., 2000). Региональный поток грунтовых вод направлен к реке Волге, их состав $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$, реже – $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, с общей минерализацией $0.1\text{-}0.6 \text{ мг дм}^{-3}$. Глубины колодцев в среднем составляют $4.0\text{-}8.0 \text{ м}$. На рис. 3 представлена карта фактического материала площадных съемок грунтовых вод вокруг Иваньковского водохранилища. Указаны опробованные несколько раз во время съемок колодцы/родники и отдельно – режимные колодцы, створы на реках, скважины ручного бурения. В левом верхнем углу под литерой А дана карта – врезка части водосбора р. Донховка; показаны федеральные трассы.

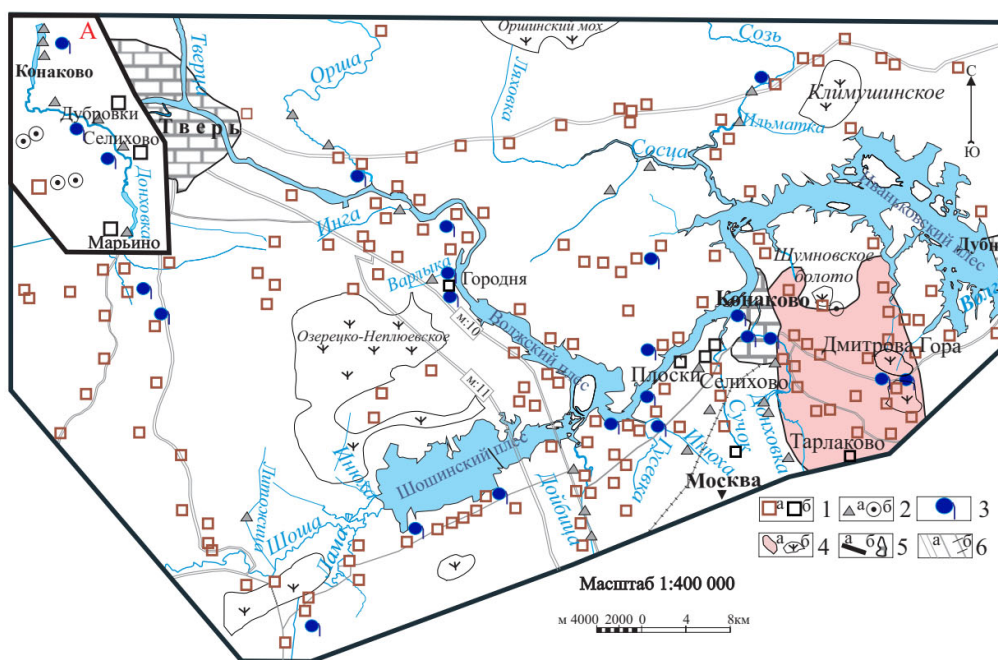


Рисунок 3. Карта фактического материала площадных съемок региона
Условные обозначения: 1. а – обследованные колодцы, б – режимные колодцы, 2. а – гидростат, б – скважина; 3. Родники; 4. а – земли Агрохолдинга, б – болота; 5. а – граница карты врезки, буква А, водосбор р. Донховка, б – города; 6. Дороги, а – автомобильные, б – железная

Figure 3. A factographic map of areal surveys of the region
Legend: 1. a – sampled wells; b - regime wells. 2. a - alignments on the rivers, b - hand-drilled well; 3. springs, 4. a – agricultural land of the Agroholding; b – mires; 5. a – boundary of the inset map, letter A, watershed area of the river Donkhovka; b – cities; 6. a – motor roads; b – railway

Гидрохимическая съемка проводилась по периметру водохранилища в полосе шириной до 17 км от уреза. Уровень антропогенной нагрузки на его берегах разный. Правобережье подвержено высокой антропогенной нагрузке. Здесь проходят федеральные трассы Москва – Санкт-Петербург М-10 и М-11, Октябрьская железная дорога, находятся г. Конаково, поселки городского типа, ООО «Дмитрогорское», входящее в крупный сельскохозяйственный Агрохолдинг «Агропромкомплектация» (далее агрохолдинг), расположенный вокруг с. Дмитрова Гора, дачные участки. На левом берегу располагаются лишь бывшие редкие деревни – ныне дачные поселения, и автотрасса Тверь – Кимры.

Результаты и обсуждение

Итоги статистической обработки данных и их анализ

По итогам II этапа исследования установлено, что солевой состав и цветность грунтовых вод согласно методу главных компонент определяют 50 % общей дисперсии. Статистический анализ показал, что независимо от сезона произошло снижение концентраций в водах всех ингредиентов, кроме магния и фосфора. Концентрации Mg^{2+} в водах растут на обоих берегах, а P – на правом, причем только в летний период. В табл. 1 показана динамика статистических характеристик Mg^{2+} и P (по $P_{общ}$) летом.

Таблица 1. Статистические характеристики содержания Mg^{2+} и $P_{общ}$ в грунтовых водах на правом и левом берегах водохранилища в летний период (мг dm^{-3})

Table 1. Statistical characteristics of the content of Mg and P tot in groundwater on the right and left banks of the reservoir in summer (mg dm^{-3})

Год	n	K_v , %	Max	Min	$\bar{x}$	Me(x)	σ
Левый берег							
1999	26	0.65/2.01 ¹	40.3/21.9	3.0/0.08	15.7/2.65	12.2/0.49	10.2/5.33
2019	40	0.6/1.27	78.1/9.75	3.4/0.04	28.1/1.07	24.4/0.18	17.0/2.13
Правый берег							
1999	66	0.6/1.4	63.4/3.29	2.4/3.0	23.4/0.48	22.0/0.22	14.0/0.67
2019	80	0.67/0.33	106.9/5.96	3.4/0.028	31.4/0.661	27.0/0.195	21.0/0.22

Примечание: 1 – В числителе значения концентраций магния, в знаменателе – фосфора, по $P_{общ}$

Коэффициент вариации K_v показывает пространственную неоднородность показателей. Распределение концентраций Mg^{2+} на берегах отличается стабильностью (узкий интервал вариальности 0.6-0.67), у фосфора пространственная неоднородность уменьшилась.

В водах левобережья произошло снижение медианных и средних значений содержаний P, правобережья – медианные значения снизились при одновременном увеличении средних. Средние значения концентраций более чувстви-

тельны к локальным участкам загрязнения по сравнению с медианными: наличие нескольких таких участков приводит к более значимому росту среднего. Большая разница между средним и медианным значениями может указывать и на отсутствие нормального закона распределения случайной величины, и на появление локальных участков с экстремальными концентрациями компонента.

Закон нормального распределения обычно не выполняется для гидрохимических показателей. Именно поэтому медианные значения являются более информативными и корректнее отражают картину пространственного распределения.

По итогам III этапа рассмотрим подробнее количественные изменения показателей. Статистические характеристики динамики солевых компонентов грунтовых вод даны в (Lapina et al., 2021). В табл. 2 представлено межennale снижение медианных значений гидрохимических показателей (съемки 1999 и 2019 гг.).

Таблица 2. Приращения медианных значений гидрохимических показателей грунтовых вод в межень 1999 и 2019 гг. по одним и тем же колодцам (мг дм⁻³)

Table 2. Increments of median values of hydrochemical parameters of groundwater in low water periods in 1999 and 2019 on the same wells (mg dm⁻³)

Сезон	Приращения медианных значений показателя (%)								
	Mz ¹	Цв -ть ²	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺
Зима	(-17)	(-75)	(-53)	(-60)	(-44)	(-22)	(-17)	(-69)	(-85)
Лето	(-13)	(-40)	(-55)	(-30)	(-29)	(-13)	(+19)	(-70)	(-64)

Примечание: 1 – Mz – общая минерализация; 2 – Цветность, градус по Pt-Co шкале.

Из табл. 2 видно, что наибольшее снижение медианных значений, особенно заметное для цветности, содержаний ионов Cl⁻, Na⁺, SO₄²⁻ и NH₄⁺, приурочено к зимней межени. Приращения медианных значений концентраций ионов K⁺, HCO₃⁻, соединений P достаточно малы и здесь не отражены. Возрастание значений произошло только у Mg²⁺, причем в летний период. Также из табл. 2 очевидно изменение соотношения ионов Ca²⁺ и Mg²⁺, более явное летом, чем зимой.

Рассмотрим динамику биогенных показателей, влияющих на эвтрофирование водоемов – соединений N и P. В табл. 3 показаны их статистические характеристики в грунтовых водах. В последнем столбце таблицы даны приращения средних и медианных значений концентраций – разницы между значениями 1999 и 2019 гг.

Очевидно снижение содержания биогенных веществ и зимой, и летом, наиболее значительное для иона NO₃⁻. Уменьшение содержания иона NH₄⁺ происходит в большей степени зимой, чем летом; рост средних значений соединений P наблюдается только летом.

Таблица 3. Статистические характеристики соединений N и P (мг дм⁻³) в грунтовых водах прибрежной зоны Иваньковского водохранилища

Table 3. Statistical characteristics of N and P compounds (mg dm⁻³) in groundwater in the coastal zone of the Ivankovo reservoir

Параметр	Max	Min	$\bar{x}$	Me(x)	σ	Приращение	
						$\bar{x}$	Me(x)
	Зима 1999/2019 (n=47)						
P _{общ}	4.5/5.8 ¹	0.01/0.07	0.53/0.45	0.2/0.19	0.91/0.90	-0.08	-0.01
PO ₄	4.5/5.37	0/0.01	0.45/0.35	0.15/0.09	0.83/0.85	-0.1	-0.75
NH ₄	3.4/1.17	0.08/0.02	0.65/0.16	0.55/0.08	0.52/0.23	-0.49	-0.47
NO ₃	138.2/66.6	0.09/0.18	31.9/15.7	20/6.2	34.8/18.4	-13.8	-16.4
Лето 1999/2019 (n=63)							
P _{общ}	3.92/6.92	0.02/0.06	0.51/0.81	0.23/0.19	0.68/1.48	+0.3	-0.05
PO ₄	2.88/6,05	0.01/0.02	0.39/0.67	0.14/0.11	0.64/1.40	+0.29	-0.03
NH ₄	2.27/3.2	0.13/0.02	0.52/0.30	0.45/0.16	0.36/0.46	-0.21	-0.29
NO ₃	138.26/107.3	0.01/0.25	36.45/15.8	23.76/7.2	38.23/21.6	-20.68	-16.63

Примечание: 1 – в числителе данные за 1999, в знаменателе – за 2019 г.

Сравнение качества воды колодцев проводилось между двумя съемками, то есть с перерывом в 20 лет. Для подтверждения выявленных тенденций рассмотрим химический состав вод в ежегодном формате по данным мониторинга. В режимную сеть станции входят колодцы, реки и родники. Обратим внимание на показатели, приращения которых максимальны (табл. 2): ионы NO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺ и P. Рассмотрим наиболее типичные объекты.

На рис. 4 показана многолетняя динамика концентраций ионов Mg²⁺ и Ca²⁺ в сентябре с 1999 по 2019 гг. в колодце д. Тарлаково (см. рис. 3).

На графике виден тренд на убывание в содержании иона Ca²⁺ и стабильность иона Mg²⁺, что подтверждает изменение их соотношения в ионном составе грунтовых вод.

Химический состав вод рек в межень априори считается сходным с составом грунтовых вод водосбора. На р. Донховке – правом притоке водохранилища, режимные наблюдения ведутся авторами с 1997 г., с частотой 8-10 раз в год (врезка, рис. 3). На рис. 5 показана динамика среднемеженных концентраций биогенных веществ, ионов Cl⁻ и SO₄²⁻ в реке, створ с. Селихово, VI-IX, 1999-2019 гг.

Очевидно, что в притоках водохранилища наблюдаются те же тенденции, что и в грунтовых водах: снижение концентраций ионов SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻ и рост P_{общ}.

Родниковый сток отражает интегральную характеристику химического состава грунтовых вод его водосборной площади. В опорных объектах мони-

торинга гидрохимические характеристики определяют круглогодично дважды в месяц. Родник в бору (Бор) наблюдается как фоновый (см. рис. 2), выходит в борту террасы Волги (Лапина и др., 2014). На рис. 6 даны кривые многолетней динамики ионов NO_3^- и $\text{P}_{\text{общ}}$ в воде родника Бор за период 2006-2020 гг.

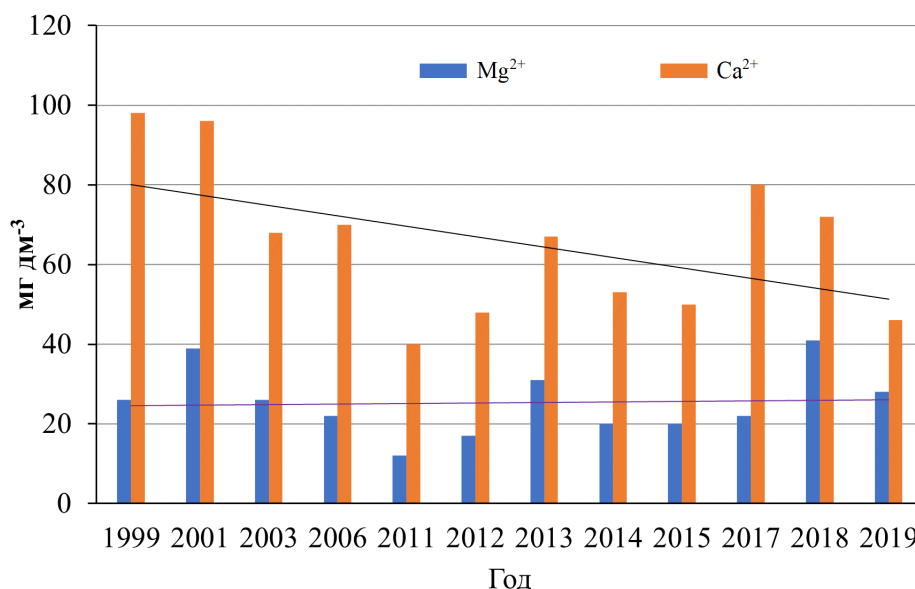


Рисунок 4. Динамика концентраций ионов Mg^{2+} и Ca^{2+} , мг дм⁻³, с линией тренда. Колодец, с. Тарлаково, сентябрь, 1999-2019 гг.

Figure 4. Dynamics of the concentrations of Mg^{2+} and Ca^{2+} ions, mg dm⁻³, with a trend line. Well, s. Tarlakovo, September, 1999-2019

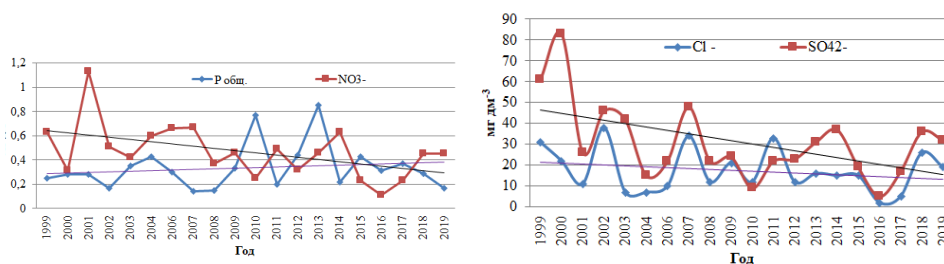


Рисунок 5. Многолетняя динамика среднемежных значений ионов $\text{P}_{\text{общ}}$ и NO_3^- (слева), ионов Cl^- и SO_4^{2-} (справа), мг дм⁻³, с линией тренда, р. Донховка, створ Селихово (VI-IX, 1999-2019 гг.)

Figure 5. Long-term dynamics of mean interim values of $\text{P}_{\text{общ}}$ and NO_3^- ions (left) and Cl^- and SO_4^{2-} ions (right), mg dm⁻³, with a trend line, r. Donkhovka, Selikhovo alignment (VI-IX, 1999-2019)

По ходу кривых наблюдается тренд на снижение для ионов NO_3^- , на увеличение – для $\text{P}_{\text{общ}}$.

На рис. 7 показана динамика отношения $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ в опорных родниках с разной локализацией.

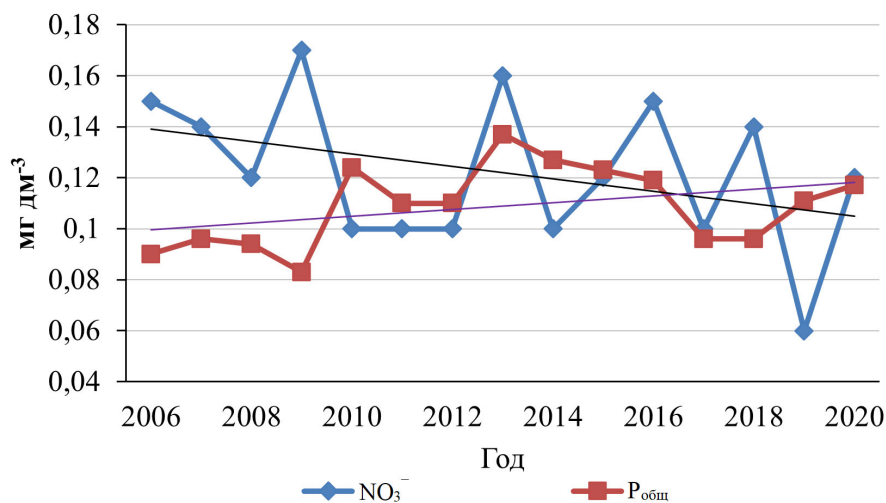


Рисунок 6. Динамика среднегодовых концентраций ионов NO_3^- (мг дм⁻³) и $\text{P}_{\text{общ}}$ (мг дм⁻³), с линией тренда, родник Бор, 2006-2020 гг.

Figure 6. Dynamics of the average annual concentrations of NO_3^- ions (mg dm⁻³) and P_{tot} (mg dm⁻³), with a trend line, spring Bor, 2006-2020

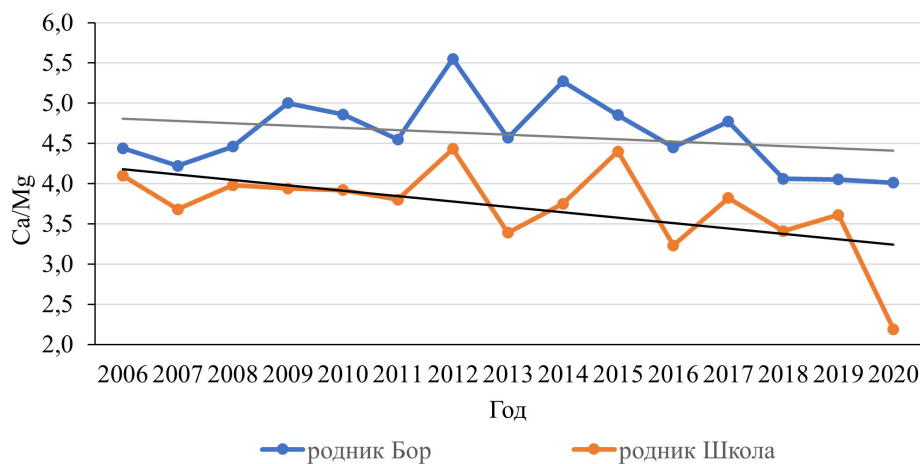


Рисунок 7. Изменение отношения среднегодовых концентраций ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в родниках Бор (фон) и Школа (город) с линией тренда, 2006-2020 гг.

Figure 7. Change in the ratio of the average annual concentrations of Ca^{2+} and Mg^{2+} ions in the Bor (Pine forest) and School (city) springs with a trend line, 2006-2020

На графиках виден тренд на снижение величины соотношения вне зависимости от расположения водосборной площади родников. По данным статистического анализа K_v отношение Ca^{2+}/Mg^{2+} летом снижается в два раза, что предполагает и возрастание концентраций ионов Mg^{2+} в летнюю межень, и снижение концентраций Ca^{2+} .

Многолетние наблюдения на опорных объектах в сети мониторинга подтверждают выявленные тенденции изменения химического состава грунтовых вод. Перейдем к выявлению причин роста содержаний в водах Mg^{2+} и $P_{общ}$.

Возрастание концентраций иона Mg^{2+} в грунтовых водах

Рассмотрим возможные источники Mg^{2+} в регионе и вероятность их реального влияния на его содержание в грунтовых водах.

1. Бурение глубоких скважин владельцами дачных домов, когда из-за отсутствия крепления обсадных труб возможен заколонный переток насыщенных ионом Mg^{2+} вод из нижележащих пластов в вышележащие. Из-за малочисленности таких скважин эта причина не может вызвать площадного изменения состава грунтовых вод.

2. Применение доломитовой муки для улучшения плодородия почв. В хозяйствах региона магниевые удобрения из-за повышенной стоимости не используют. Их применяют в дачных поселениях, большинство которых располагается на правом берегу. Однако концентрации Mg^{2+} выросли на обоих берегах водохранилища.

3. Потепление зим, когда химический состав вод в теплое время года формируется за счет верхних водоносных горизонтов, а в холодное – более глубоких горизонтов зоны активного водообмена (Боревский, Марков, 2014). Тогда при снижении цветности увеличилась бы минерализация грунтовых вод, а она упала. Указанный источник Mg^{2+} может учитываться на западе территории, где местами встречаются субнапорные подземные воды $HCO_3 - Mg$ состава, что требует детального изучения и пока нами не рассматривается.

4. Атмосферные осадки. Анализ имеющихся данных приводит к выводу о наиболее вероятном поступлении Mg^{2+} атмосферным путем.

Основной процесс изменения состава лежалого снега состоит в растворении карбонатов кальция и магния, поступающих в снег с пылеватыми частицами (Красинцева и др., 1977). Результаты снегосъемки, проведенной авторами в пределах г. Конаково в марте 2009 г., выявили в 94% образцов отсутствие иона Ca^{2+} , а диапазон концентраций Mg^{2+} составил 1.22-1.83 мг дм⁻³, что так же может быть обусловлено и составом противогололедных реагентов. В 2018 г. итоги снегосъемки по г. Конаково (Комиссаров, Чекмарева, 2019) дали интервал концентраций Mg^{2+} 0.5-1.0 мг дм⁻³, что подтверждает высокую вариабельность химического состава осадков (Посохов, 1985).

Зимой 2022 г. для проверки факта накопления ионов Mg^{2+} раз в месяц отбирали пробы снега. Место отбора – сосновая роща, инструмент – пластиковая труба, таяние проведено при комнатной температуре. Высота колонки в январе и апреле составила 15 см, в феврале и марте – 30 см. Результаты анализов представлены в табл. 4.

Таблица 4. Динамика содержания иона Mg^{2+} ($mg\ dm^{-3}$), снег, I-IV. 2022 г.

Table 4. Dynamics of Mg^{2+} ion content ($mg\ dm^{-3}$), snow, I-IV. 2022

Глубина, см	Дата отбора снега			
	15.01.2022	15.02.2022	17.03.2022	01.04.2022
0 -15	0.98	0.98	1.45	0.48
15-30	-	0.49	3.45	-

В феврале-марте происходит увеличение концентраций Mg^{2+} в снеговой толще, с началом снеготаяния – уменьшение, скорее всего, вызванное выносом тальными водами. Наблюдения за уровнями грунтовых вод в скважинах на надпойменных террасах показали, что весной талые воды поступают на зеркало грунтовых вод импульсно, уровень повышается резко на 0.2-0.25 м (Лапина и др., 2014). По трещинам и т.п. талые воды сразу поступают на зеркало либо задерживаются в слабопроницаемых слоях зоны аэрации, постепенно продвигаясь вниз с инфильтрационными водами. Расчет содержания Mg^{2+} в талых водах при средней высоте лежалого снега 0.3 м и средних влагозапасах 100 мм (Мирзоев, Мирзоев, 1995) на территории г. Конаково площадью 38 км² дает цифру 4.64 т, что составит 400 мг на 1 м², или в почвенном растворе в 1 м³ почвогрунта при полном насыщении концентрация Mg^{2+} возрастет на 0.4 мг дм⁻³.

По данным (Еремина, 2019), в Московской области, где климат аналогичный, среднее содержание Mg^{2+} составляет 0.17 мг дм⁻³. Регулярные наблюдения за химическим составом осадков (г. Конаково, 2008-2013 гг.) дают интервал содержания Mg^{2+} 0.4-4.3 мг дм⁻³ (Лапина и др., 2014). В табл. 5 показано содержание Mg^{2+} летом 2018 и 2019 гг. в единичных пробах.

Таблица 5. Содержание иона Mg^{2+} ($mg\ dm^{-3}$) в осадках, г. Конаково (VI-VIII)

Table 5. Content of Mg^{2+} ion ($mg\ dm^{-3}$) in precipitation, Konakovo (VI-VIII)

2018 г.		2019 г.		
Месяц				
VI	VII	VI	VII	VIII
1.46	1.0	2.3	1.83	2.93

Эти данные в совокупности с результатами снегосъемок 2009 и 2018 гг. позволяют предположить транзитный путь его поступления, так как ионный состав осадков в районе работ либо HCO_3^- -Ca (Мотузова и др., 2009; Лапина и др., 2014), либо SO_4^{2-} - HCO_3^- -Ca (Цыганов, 2019). Именно потому, что осадки, содержащие Mg^{2+} , проходят транзитом, наблюдается рост Mg^{2+} в грунтовых водах на обоих берегах водохранилища.

Доказательством гипотезы поступления Mg^{2+} в грунтовые воды с осадками является изменение химического состава вод болота Шумново. Это болото верхового типа, питание которого осуществляется только атмосферным путем. Начиная с 2014 г., в катионном ряду болотных вод преобладают ионы Mg^{2+} (Лапина, 2021).

Возрастание концентрации фосфора в грунтовых водах

Снижение концентраций биогенных веществ, кроме фосфора, и его рост в водах только на правом берегу с наступлением тепла, указывает на следующие возможные источники его поступления в грунтовые воды.

Атмосферные осадки. Доля поступления фосфора на территории центра России за счет осадков составляет от 5-12% (Моделирование ..., 1995) до 17% (Еремина, 2019). Данные авторов позволяют определить, что с 2008 по 2013 гг. с дождями за год поступало в среднем 0.3, со снегом – 0.07 кг га⁻¹ год Р, а в 2019 г. – соответственно 0.15 и (по Комиссаров, Чекмарева, 2019) – 0.045 кг га⁻¹ год Р. Представленные цифры не сопоставимы с количеством вносимых фосфорных и органических удобрений – до 70 кг га⁻¹ Р (по данным Тверского Статуправления), поэтому осадки не являются основным источником роста фосфора.

Сточные воды дачных и коттеджных поселков. Согласно данным Управления Росреестра по Тверской области на 01.01.2019 г., площадь земель сельскохозяйственного назначения составляла 24.4, населенных пунктов без г. Конаково – 5.2, садоводческих товариществ – 1.3% от всей площади Конаковского района (Отчет..., 2020). Для определения поступления в окружающую среду Р от поселений проведем простой расчет для реального садоводческого некоммерческого товарищества (СНТ) «Ремонтник», общей площадью 65 га. СНТ состоит из 700 отдельных участков, находится близ д. Плоски (см. рис. 3), в среднем дачники проживают на своих участках 4 месяца в году. Условимся, что на каждом участке живет 4 человека. В сутки от жизнедеятельности взрослого человека в окружающую среду поступает суммарно по твердым и жидким отходам 1.35 г Р₂О₅ (Прянишников, 1952). Несложный пересчет дает цифру поступления за 4 месяца в окружающую среду на территории СНТ 2.46 кг га⁻¹ Р, что с учетом их площадной доли (1.3 %) также исключает этот источник как основной. Жители коттеджных поселков малочисленны и редко приезжают.

Удобряемые почвы сельхозугодий. По данным (Мотузова и др., 2010), значительная часть антропогенной нагрузки по Р для грунтовых вод территории исходит от почв.

Имеющиеся данные позволили сравнить химический состав почв в одном и том же месте до роста сельскохозяйственной нагрузки и после. Пробуренные скважины расположены близ Шумновского болота (см. рис. 3). В 2005 г. в почвах залежи содержание подвижного Р (по Кирсанову) не превышало 30-50 мг Р₂О₅/кг сухой породы. В 2018 г. пустующие земли приобрел агрохолдинг, их вспахали, удобрили, согласно данным Тверьстатуправления, в дозе 141 кг д.в./га минеральных и приблизительно 40 т га⁻¹ органических удобрений, посадили кукурузу. В октябре 2019 г. на прежнем месте содержание подвижного фосфора в почвенном слое до глубины 30 см составило 1480-1650 мг Р₂О₅/кг сухой породы. Следовательно, произошел существенный рост подвижного фосфора (в 30-50 раз). Согласно данным (Титова и др., 2011), содержание в дерново-подзолистых почвах подвижного Р в среднем 1200 мг Р₂О₅/кг относится к гипервысоким.

Предыдущими исследованиями почв береговой зоны доказано, что лишь 10-15% от количества внесенных фосфорных удобрений усваиваются растениями (Лола и др., 1988), часть закрепляется в почвенном слое, а остаток по сложенной песками зоне аэрации может продвигаться с инфильтрационными водами вниз.

Таким образом, именно зафосфачивание почв сельскохозяйственных угодий можно считать наиболее вероятным источником обогащения грунтовых вод фосфором.

Заключение

Изучению влияния климатических изменений на режимные характеристики подземных вод, в том числе грунтовых, посвящено много работ. Основы исследований заложены В.С. Ковалевским (Ковалевский и др., 1999). Исследуются главным образом гидродинамические процессы. Например, в работе (Гриневский, Поздняков, 2017) показано, что на ю-з Московского артезианского бассейна наблюдается рост среднесезонного инфильтрационного питания подземных вод на 20-30 мм год⁻¹. Трансформация химического состава грунтовых вод в связи с изменением климата пока изучена слабо. В работе (Шилькрот, 2015) отмечен рост содержания фосфора в грунтовых водах близ Валдайского заповедника в Тверской области, обусловленный именно потеплением. Другие авторы (Смоляр, 2017) считают, что нет прямого доказательства связи между изменением климата и трансформацией грунтовых вод.

Установлено, что при изучении химического состава природных вод с помощью статистических методов на достаточно больших территориях важно знать и средние, и медианные значения, так как между ними наблюдается большая разница; разнонаправленность указывает на наличие локальных источников загрязнения.

Представленные результаты исследования выявили трансформацию химического состава грунтовых вод за 20 лет и ее зависимость от роста температур воздуха зимой. Увеличение питания грунтовых вод из-за оттепелей подтверждено повсеместным снижением медианных значений общей минерализации и цветности на 17 и 75% соответственно в холодный период. Уменьшение концентраций сульфатов и хлоридов, вероятно, связано с упадком промышленности в регионе.

Снизилась концентрация всех компонентов солевого состава грунтовых вод, кроме Mg^{2+} . Возможной причиной роста концентраций Mg^{2+} является его поступление с атмосферными осадками. Согласно (Еремина, 2019) в осадках г. Москвы на территории Ботанического сада катионный состав постоянен, доминирует ион Ca^{2+} . Следовательно, рост Mg^{2+} в грунтовых водах может быть региональной особенностью.

Медианные и средние значения содержаний всех биогенных веществ снизились на 15-85% зимой, на 20-50% летом, кроме средних значений концентраций P, возросших на 49%. Ранее считалось, что фосфор удобрений

выносятся с урожаем, а его остатки закрепляются в верхнем почвенном слое и в грунтовые воды не проникают. В последние годы многие исследователи сообщают о явной фосфатизации гидросферы и литосферы, что говорит о нарушении распределения и миграции фосфора в окружающей среде (Титова и др., 2011; Шилькрот, 2015).

Методом исключения показано, что главный источник поступления фосфора в грунтовые воды – это зафосфачивание почв сельскохозяйственных угодий, вызванное избыточным внесением фосфорных удобрений и навоза, который способствует росту подвижности фосфора (Титова и др., 2011). Ни поступление соединений фосфора с атмосферными осадками, ни сточные воды садоводческих товариществ и дачных поселений не оказывают существенного воздействия на его концентрации в грунтовых водах. Полученные результаты не противоречат исследованиям других авторов (Ясинский, Даденко, 2018). Выявленные тенденции подтверждены данными многолетних непрерывных наблюдений за составом вод режимных объектов.

Ситуация поступления фосфатов в грунтовые воды прибрежной территории Иваньковского водохранилища усугубляется тем, что именно здесь распространены почвы легкого гранулометрического состава, подстилаемые флювиогляциальными песками. Опасность евтрофирования водоемов и водотоков береговой зоны возрастает по причине роста фосфора на фоне снижения азота, поэтому необходимо ужесточить контроль за соотношением этих питательных элементов в силу питьевого назначения Иваньковского водохранилища.

Одной из мер улучшения ситуации может быть введение государственного контроля за агротехническими работами частных сельскохозяйственных организаций.

*Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0002
(№ государственной регистрации Государственного задания ИВП РАН
122041100236-4).*

Список литературы

Боревский, Б.В., Марков, М.Л. (2014) Является ли меженный расход рек мерой питания подземных вод или общего подземного стока, *Разведка и охрана недр*, № 5, М., ФБГУ «ВИМС», с. 10-16.

ГОСТ 31861-2012 «Вода. Общие требования к отбору проб» (2013) М., Стандартинформ, 32 с.

Гриневский, С.О., Поздняков, С.П. (2017) Ретроспективный анализ влияния климатических изменений на формирование ресурсов подземных вод, *Вестн. Моск. Ун-та, сер. 4. Геология*, № 2, с. 42-51.

Иваньковское водохранилище: современное состояние и проблемы охраны (2000) М., Наука, 344 с.

Еремина, И.Д. (2019) Химический состав атмосферных осадков в Москве и тенденции его многолетних изменений, *Вестник Московского университета*, серия 5, География, № 3, с. 3-10.

Ковалевский, В.С., Федорченко, Е.А., Клиге, Р.К. (1999) Возможные изменения запасов и уровней грунтовых вод в бассейне Волги, *Известия АН. Серия географ.*, № 5, с. 61-67.

Комиссаров, А.Б., Чекмарева, Е.А. (2019) Оценка качества снежного покрова на водосборной территории Иваньковского водохранилища, *Экологический сб. 7. Труды мол. ученых. Всерос. мол. конф.*, Тольятти, ИЭВБ РАН, «Анна», с. 238-242.

Корнева, Л.Г. (2015) *Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги*, Кострома, Костромской печатный дом, 284 с.

Красинцева, В.В., Кузьмина, Н.П., Сеньявин, М.М. (1977) *Формирование минерального состава речных вод*, М., Наука, 176 с.

Лапина, Е.Е. (2021) Динамика гидрохимического состава выработанных верховых болот (Тверская область), *Мат-лы конф. «XI Галкинские чтения»*, СПб, БИН РАН, с. 130-131.

Лапина, Е.Е., Ахметьева, Н.П., Кудряшова, В.В. (2014) *Родники долины верхней Волги и ее притоков: условия формирования, режим, охрана*, ООО «Купол», Тверь, 256 с.

Лапина, Е.Е., Кудряшова, В.В. (2021) Тенденции изменения химического состава грунтовых вод водосбора вокруг Иваньковского водохранилища. Современные проблемы водохранилищ и их водосборов, *Труды VII всеросс. н-пр. конф. с междунар. участием*, Пермь, с. 307-311.

Лапина, Л.Э., Григорьева, И.Л. (2020) Анализ изменения температуры воздуха и суммы осадков по данным метеостанций Старица и Тверь за многолетний период, *Вестник ТвГУ, серия "География и геоэкология"*, № 31, с. 57-78, doi 10.26456/2226-7719-2020-3-59-80.

Лола, М.В., Ахметьева, Н.П., Григорьев, В.Т., Лахтюк, Р.А. (1988) Содержание в почвах биогенных веществ и их влияние на евтрофирование водоема, *Водные ресурсы*, № 6, с. 108-116.

Новиков, Ю.В., Ласточкина, К.О., Болдина, З.Н. (1990) *Методы исследований качества воды водоемов*, под ред. А.П. Шицковой, М., Медицина. 400 с.

Мирзоев, Е.С., Мирзоев, А.Е. (1995) *Конаковский район. Краеведческий справочник*, Тверь, 330 р.

Моделирование режима фосфора в долинном водохранилище (1995) Под ред. К.К. Эдельштейна, М., Изд-во МГУ, 80 с.

Мотузова, Г.В., Барсова, Н.Ю., Карпова, Е.А., Кочарян, А.Г. (2009) Формирование химического состава почвенных вод в береговой зоне Иваньковского водохранилища, *Известия РАН. Серия географ.*, № 3, с. 109-117.

Мотузова, Г.В., Барсова, Н.Ю., Карпова, Е.А., Кочарян, А.Г. (2010) Состав лизиметрических вод почв Верхневолжских ландшафтов, *Почвоведение*, № 2, с.1-9.

Отчет о наличии земель Конаковского района и распределении их по земельным категориям (2020) Земельный комитет Администрации Конаковского района.

Посохов, Е.В. (1985) *Ионный состав природных вод. Генезис и эволюция*, Л., Гидрометеиздат, 254 с.

Прянишников, Д.Н. (1952) *Агрохимия*. Т. 1. Избр. соч., М., Гос. Изд-во с.х. лит-ры, 691 с.

Смоляр, В.А. (2017) Прогноз изменения ресурсов подземных вод под влиянием климатических условий, *Геология и охрана недр*, № 4 (65), с. 60-66.

Титова, В.И., Варламова, Л.Д., Дабахова, Е.В., Бахарев, А.В. (2011) Изучение фосфорных удобрений и фосфатного состояния почв, *Агрохимический вестник*, № 2, с. 3-6.

Шилькрот, Г.С. (2015) О миграции фосфора и других химических элементов с грунтовым стоком в сельских ландшафтах, в кн.: *Сб. науч. трудов конф. «Научное обеспечение реализации водной стратегии РФ на период до 2020 г.»*, КНЦ РАН, с. 386-394.

Цыганов, А.А. (2019) Оценка состояния окружающей среды города Твери, *Вестник Тверского университета. Серия «География и геоэкология»*, № 2 (26), с. 56-77.

Ясинский, Н.С., Даценко, Ю.С. (2018) Закономерности формирования речного стока фосфора для целей гидрологического моделирования, *Природообустройство*, № 1, с. 25-33.

Lapina, Elena, Lapina, Larisa, Kudrajshova, Vera (2021) Transformation of the groundwater composition in coastal zone of the Ivankovo reservoir during 20 years, *Engineering geology and hydrogeology*, 35. Sofia, pp. 3-14, http://igh-bg.com/Vol/vol_35.html.

References

Borevskij, B.V., Markov, M.L. (2014) YAvlyaetsya li mezhenyj raskhod rek meroj pitaniya podzemnyh vod ili obshchego podzemnogo stoka [Is river low-water flow a measure contributing to underground water or common total underground water inflow], *Razvedka i ohrana neдр*, Moscow, no. 5, pp. 10-16.

GOST 31861-2012 «Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob» (2013) [Water. General requirements for sampling], Standartinform, Moscow, Russia, 32 p.

Grinevskij, S.O., Pozdnyakov, S.P. (2017) Retrospektivnyj analiz vliyaniya klimaticheskikh izmenenij na formirovanie resursov podzemnyh vod [Retrospective analysis of the impact of climate change on the formation of groundwater resources], *Vestn. Mosk. Un-ta, ser. 4. Geologiya*, no. 2, pp. 42-51.

Ivan'kovskoe vodohranilishche: sovremennoe sostoyanie i problemy ohrany (2000) [Ivankovo Reservoir: Current State and Protection Problems], Moscow, Russia, 344 p.

Eremina, I.D. (2019) Himicheskij sostav atmosferyh osadkov v Moskve i tendencii ego mnogoletnih izmenenij [The chemical composition of atmospheric precipitation in Moscow and the trends of its long-term changes], *Vestn. Mosk. Unta, ser. 5. Geografiya*, no. 3, pp. 3-10.

Kovalevskij, V.S., Fedorchenka, E.A., Klige, R.K. (1999) Vozmozhnye izmeneniya zapasov i urovnej gruntovyh vod v bassejne Volgi [Possible changes of reserves and ground water levels in the Volga river basins in accordance with the climate change], *Izvestiya AN. Seriya geograficheskaya*, no. 5, pp. 61-67.

Komissarov, A.B., Chekmareva, E.A. (2019) Ocenka kachestva snezhnogo pokrova na vodosbornoj territorii Ivan'kovskogo vodohranilishcha [Assessment of the quality of snow cover in the catchment area of the Ivankovo reservoir], *Ekologicheskij sb. 7, Trudy mol. Uchenyh, Vseros. mol. konf. Tol'yatti*, pp. 238-242, doi: 10.24411/9999-010A-2019-10059.

Korneva, L.G. (2015) *Fitoplankton vodohranilishch bassejna Volgi* [Phytoplankton of reservoirs of the Volga basin], Kostroma, Russia, 284 p.

Krasinceva, V.V., Kuz'mina, N.P., Senyavin M.M. (1977) *Formirovanie mineral'nogo sostava rechnyh vod* [Formation of the mineral composition of river waters], Moscow, Russia, 176 p.

Lapina, E.E. (2021) *Dinamika gidrohimicheskogo sostava vyrabotannyh verkhovyh bolot (Tverskaya oblast')* [Hydrochemical composition dynamics of degraded bogs waters (Tver Region)], Mat-ly konf. XI Galkinskije chteniya, St. Petersburg, Russia, pp. 130- 131.

Lapina, E.E., Ahmet'eva, N.P., Kudryashova, V.V. (2014) *Rodniki doliny verhnej Volgi i ee pritokov: usloviya formirovaniya, rezhim, ohrana*, [Springs of the valley of the upper Volga and its tributaries: formation conditions, regime, protection], Tver', Russia, 256 p.

Lapina, E.E., Kudryashova, V.V. (2021) Tendencii izmeneniya himicheskogo sostava gruntovyh vod vodosbora vokrug Ivan'kovskogo vodohranilishcha, [Tendencies of groundwater quality changes around Ivankovo reservoir over 20 years], *Sovremennye problemy vodohranilishch i ih vodosborov. Trudy VII Vseross. n-pr. konf. s mezhdunar*, Perm', Russia, pp.307-311.

Lapina, L.E., Grigor'eva, I.L. (2020) Analiz izmeneniya temperatury vozduha i summy osadkov po dannym meteostancij Starica i Tver' za mnogoletnij period [Analysis of changes in air temperature and the amount of precipitation according to the data of Staritsa and Tver meteorological stations over a long period], *Vestnik TvGU, seriya "geografiya i geoekologiya"*, no. 3(31), pp.57-78, doi 10.26456/2226-7719-2020-3-59-80.

Lola, M.V., Ahmet'eva, N.P., Grigor'ev, V.T., Lahtyuk, R.A. (1988) Soderzhanie v pochvah biogennyh veshchestv i ih vliyanie na evtrofirovanie vodoema [The

content of biogenic substances in soils and their influence on the eutrophication of the reservoir], *Vodnyye resursy*, no. 6, pp. 108-116.

Novikov, Yu.V., Lastochkina, K.O., Boldina, Z.N. (1990) *Metody issledovaniy kachestva vody vodoemov*, [Methods for studying the quality of water in reservoirs], in A.P. Shickovoj (ed.), *Medicina*, Moscow, Russia, 400 p.

Mirzoev, E.S., Mirzoev, A.E. (1995) *Konakovskij rajon. Kraevedcheskij spravochnik* [Konakovsky district. local history guide], Tver', Russia, 330 p.

Modelirovanie rezhima fosfora v dolinnom vodohranilishche (1995) [Modeling of the Phosphorus Regime in a Valley Reservoir], pod red. K.K. Edel'shtejna, Moscow, Russia, 80 p.

Motuzova, G.V., Barsova, N.YU., Karpova, E.A., Kocheryan, A.G. (2009) *Sostav lizimetricheskikh vod pochv Verkhnevolzhskikh landshaftov* [Composition of lisimetric waters from soils of Upper Volga landscapes], *Pochvovedeniye*, vol. 42, no. 2, pp. 209-216.

Motuzova, G.V., Barsova, N.YU., Karpova, E.A., Kocheryan, A.G. (2010) *Formirovanie himicheskogo sostava pochvennykh vod v beregovoj zone Ivan'kovskogo vodohranilishcha* [Forming of chemical content in the coast zone of Ivankovo reservoir], *Izvestiya RAN, Seriya geograficheskaya*, no. 3, pp. 109-117.

Otchet o nalichii zemel' Konakovskogo rajona i raspredelenii ih po zemel'nykh kategoriyam (2020) [Report on the availability of lands in the Konakovo district and their distribution by land categories], *Zemel'nyj komitet Administracii Konakovskogo rajona*, Russia.

Posohov, E.V. (1985) *Ionnyj sostav prirodnykh vod. Genezis i evolyuciya* [Ionic composition of natural waters]. Genesis and evolution], Leningrad, Russia, 254 p.

Pryanishnikov, D.N. (1952) *Agrokhimiya* [Agrochemistry], vol. 1., State. Publishing house agricultural liter, Moscow, Russia, 691 p.

Smolyar, V.A. (2017) *Prognoz izmeneniya resursov podzemnykh vod pod vliyaniem klimaticheskikh uslovij* [Forecast of changes in groundwater resources under the influence of climatic conditions], *Geologiya i ohrana nedr*, no. 4 (65), pp. 60-66.

Titova, V.I., Varlamov, L.D., Dabahova, E.V., Baharev, A.V. (2011) *Izuchenie fosfornykh udobrenij i fosfatnogo sostoyaniya pochv* [The study of phosphate fertilizers and the phosphate state of soils], *Agrohimicheskij vestnik*, no. 2, pp. 3-6.

SHil'krot, G.S. (2015) *O migracii fosfora i drugih himicheskikh elementov s gruntovym stokom v sel'skikh landshaftah* [On the migration of phosphorus and other chemical elements with ground runoff in rural landscapes], sb. n. trudov konf., *Nauchnoe obespechenie realizacii vodnoj strategii RF na period do 2020*, pp. 386-394.

Cyganov, A.A. (2019) *Ocenka sostoyaniya okruzhayushhej sredy` goroda Tveri* [Assessment of the state of the environment of the city of Tver], *Vestnik Tverskogo*

universiteta, Seriya «Geografiya i geoe`kologiy, no. 2(26). pp. 56-77, doi.org/10.26456/2226-7719-2019-2-56-77.

Yasinskiy, N.S., Datsenko, YU.S. (2018) Zakonomernosti formirovaniya rechnogo stoka fosfora dlya tseley gidrologicheskogo modelirovaniya [Patterns of the formation of phosphorus river runoff for the purposes of hydrological modeling], *Prirodoobustroystvo*, no. 1, pp. 25-33.

Lapina, Elena, Lapina, Larisa, Kudrajshova, Vera. (2021) Transformation of the groundwater composition in coastal zone of the Ivankovo reservoir during 20 years. *Engineering geology and hydrogeology*, 35, Sofia, pp. 3-14.

Поступила в редакцию: 13.08.2022;

Доработана после рецензирования: 14.04.2023.

Для цитирования / For citation:

Лапина, Е.Е., Кудряшова, В.В., Лапина, Л.Э. (2023) Изменения химического состава грунтовых вод вокруг Иваньковского водохранилища за 20 лет, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXIV, № 1-2, с.18-37, doi: 10.21513/0207-2564-2023-1-2-18-37.

Lapina, E.E., Kudryashova, V.V., Lapina, L.E (2023) Changes in the chemical composition of groundwater around the Ivankovo reservoir over 20 years, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXIV, no. 1-2, pp. 18-37, doi: 10.21513/0207-2564-2023-1-2-18-37.