

## ОСОБЕННОСТИ ПРОГНОЗА ДИНАМИКИ РОДНИКОВОГО СТОКА В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

*Е.Е. Лапина\*, Л.Э. Лапина*

ФГБУН Институт водных проблем Российской академии наук,  
Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3; \*shritter\_elena@rambler.ru

**Реферат.** Иваньковское водохранилище является основным источником питьевого водоснабжения г. Москвы. Его береговая зона, где разгружаются родники различных типов – это барьер (или источник) для поступления загрязняющих веществ в водоем.

Цель исследований – прогноз приращений расходов нисходящих родников и оценка трендов гидрохимических показателей (ионов кальция, магния, гидрокарбонатов и хлора) качества родниковых вод за 13 лет.

В основу работы легли материалы режимных наблюдений за состоянием опорного родника, расположенного на II надпойменной террасе Волги, за период 2006-2018 гг. При обработке гидрохимических данных с целью сравнения результатов использовали два подхода. Один – это разделение массива на две группы в хронологическом порядке (2006-2012 и 2013-2018), другой – по водности года, где первая группа – это годы низкой и средней водности, вторая – высокой.

Зависимость между суммой атмосферных осадков и приращением дебита предлагается описывать обыкновенным дифференциальным уравнением, что позволит прогнозировать дебит нисходящих родников региона по сумме атмосферных осадков с шагом на ближайшие полгода.

Полученный результат верифицирован на данных уровня режима грунтовых вод скважины 3020, пробуренной на II надпойменной террасе, за период 2001-2003 гг. Максимальный коэффициент корреляции между приращением уровня грунтовых вод и суммой осадков наблюдается при аналогичном шаге. При анализе уравнения получено значение суммы осадков, разделяющее режим повышения или понижения расхода родника (уровня грунтовых вод). Для родника эта цифра составляет 296, для скважины – 316 мм.

Статистический анализ многолетней динамики гидрохимических компонентов родникового стока показал, что медианное значение является более чувствительной характеристикой к изменениям внешних условий, чем среднеарифметическое, для гидрокарбонатов и кальция. С помощью непараметрического критерия выявлен сдвиг медианного значения концентраций иона гидрокарбонатов и кальция в родниковых водах в сторону повышения. Среднемноголетний градиент составил для гидрокарбонатов  $1 \text{ мг дм}^{-3} \text{ год}^{-1}$ , для кальция –  $0.17 \text{ мг дм}^{-3} \text{ год}^{-1}$ .

Примененные подходы к разделению данных на группы для кальция и магния дают различные оценки трендов: для гидрокарбонатов – одинако-

вые, для хлоридов противоречивые. Статистический анализ данных, разделенных в хронологическом порядке, показал, что для кальция и магния существует значимый тренд на повышение, при подходе по водности года тренды не обнаружены.

**Ключевые слова.** Родниковый сток, приращение дебита, гидрохимические тренды, кальций, магний, гидрокарбонаты, медиана.

## Введение

Иваньковское водохранилище, созданное на реке Волга (отрезок Тверь – Дубна) на юго-востоке Тверской области, обеспечивает Московскому мегаполису до 60% объема воды питьевого назначения (Лапина и др., 2014). Качество и объем питающих водохранилище подземных вод важно не только контролировать, но и прогнозировать, учитывая возможность изменения внешних условий. Родниковый сток дает интегральную характеристику подземного стока, а режимные наблюдения за родниками – наиболее приближенную к реальности картину состояния подземных вод (Злобина и др., 2017).

Целью исследований являлся прогноз приращений расходов родников и оценка трендов гидрохимических показателей качества родниковых вод за многолетний период.

Родниковый сток в долине р. Волги приурочен преимущественно к основанию II и III цокольных террас, к границе аллювиальных песчаных отложений с подстилающими суглинками. На протяжении береговой зоны по периметру водохранилища визуально отмечаются места открытой разгрузки подземных вод в виде склонового высачивания, одиночных и множественных выходов; при сработке водохранилища разгрузка происходит в виде полосы маленьких фонтанчиков (Лапина и др., 2014; Яковлев, 2019). Водосборная площадь родников входит в бассейн Иваньковского водохранилища, в геоморфологическом отношении охватывает часть III надпойменной террасы и древних аллювиальных террас Волги.

В геологическом строении водосборного бассейна нисходящих родников долины Волги принимают участие аллювиальные отложения а(3t)III, мощностью 2-8 м, представленные кварцево-полевошпатовыми песками, в основании которых встречены галька и гравий. Пески залегают на флювиогляциальных отложениях fIIIms времени отступления последнего ледника, мощностью 1-5 м, представленных супесями и пылеватыми суглинками с гравием и галькой, их подстилают бурые суглинки московской морены gIIIms, мощностью 13-26 м (Лапина и др., 2014).

К песчаным и супесчаным отложениям приурочен единый верхнесредне-четвертичный аллювиально-флювиогляциальный водоносный горизонт. Его кровля залегают на глубине 0.6-1.0 м, подошва – на 6-10 м.

Безнапорные воды горизонта, уязвимые к поступающим с дневной поверхности загрязнениям, в целом нейтральные, по степени минерализации пресные, по общей жесткости – мягкие, редко умеренно-жесткие, преимущественно  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$  типа. Дебиты родников в береговой

---

зоне водохранилища варьируют в диапазоне  $0.01-0.7 \text{ дм}^3 \text{ сек}^{-1}$ , большинство в разной степени подпитывается глубокими напорными водами (Лапина и др., 2014).

## Материалы и методы

Работы проводились в филиале Института водных проблем РАН – Ивановской научно-исследовательской станции, расположенной в г. Конаково Тверской области. В режимную сеть станции входят колодцы, скважины и родники водосборного бассейна Ивановского водохранилища. В опорных объектах гидродинамические характеристики определяются раз в декаду, гидрохимические – дважды в месяц. Анализы выполняются в аттестованной гидрохимической лаборатории НИС по стандартным методикам (Новиков и др., 1990).

В основу работы легли материалы круглогодичных режимных наблюдений, выполненных одним из авторов, за состоянием опорного родника Бор в течение 2006-2018 гг., и скважины 3020, вскрывающей грунтовые воды, за 2001-2003 годы.

Скважина находится на поверхности II надпойменной террасы Волги (пойма и первая терраса затоплены), в 400 м от уреза, близ д. Плоски. Общая глубина скважины 6.5 м.

Родник нисходящий, выходит на дневную поверхность в нижней части II надпойменной террасы Волги, по контакту аллювиальных песков и моренных суглинков, в 120 м от уреза; питающим горизонтом служит аллювиальный и гидравлически связанные с ним флювиогляциальный и водноледниковый (Ковалевский, 2001).

Атмосферные осадки измерялись на метеоплощадке Ивановской НИС. На рис. 1 показано расположение описанных объектов на водосборе Ивановского водохранилища.

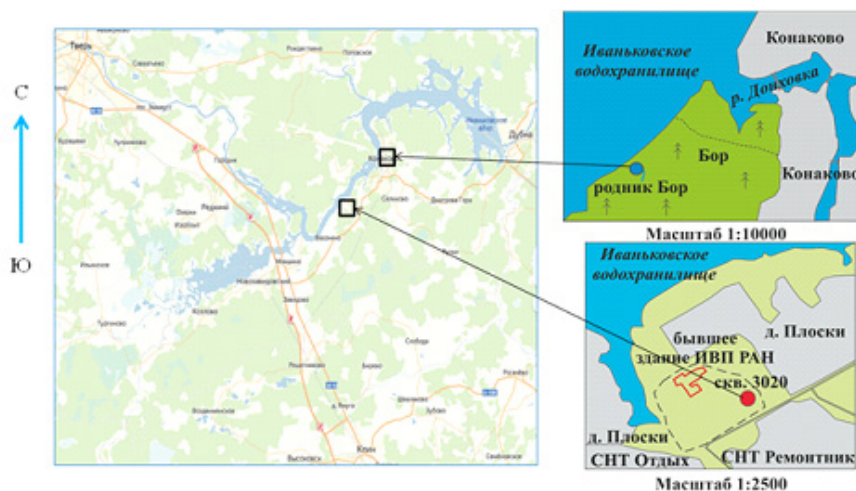


Рисунок 1. Расположение объектов исследования по отношению к Ивановскому водохранилищу

Нами проанализированы данные по гидродинамике объектов и гидрохимии родника (концентрации гидрокарбонат-иона, ионов кальция, магния и хлоридов) с использованием методов корреляционного анализа, наименьших квадратов и медианного критерия для проверки значимости сдвига в данных.

В работе использовали несколько методических подходов. Для гидрохимических показателей массив данных разбивали на два последовательных периода: 2006-2012 и 2013-2018 гг. (назовем этот подход хронологическим), и на группы разной водности – «многоводные годы» и «маловодные + норма» (гидрологический подход).

Данные по гидродинамике родникового стока разделили на холодный период года (октябрь – март) и теплый период (апрель – сентябрь). На рис. 2 представлены среднесезонные расходы родника и полугодовые суммы осадков за весь период исследований.

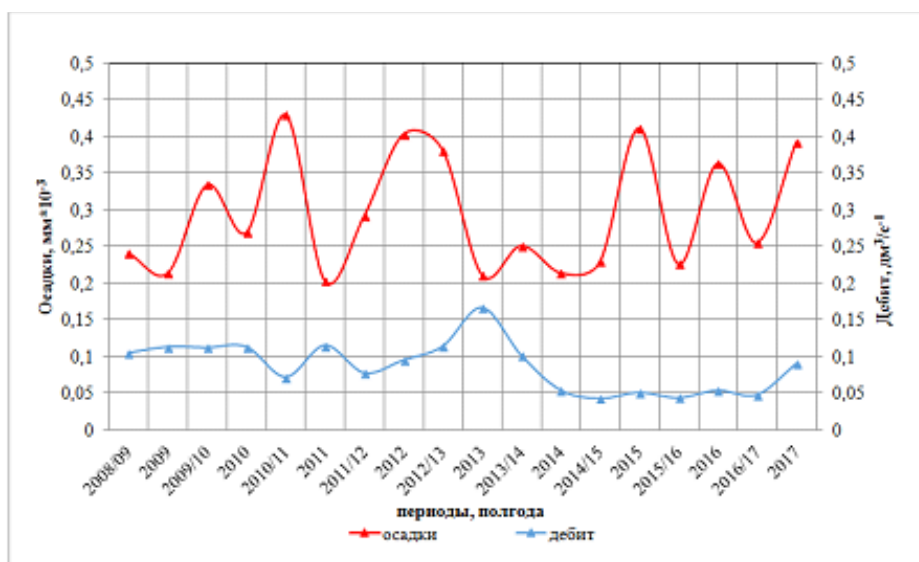


Рисунок 2. Динамика осредненных за полгода дебитов родника и сумм атмосферных осадков

## Результаты

### *Анализ данных наблюдений за расходами родника и сумм атмосферных осадков*

По объекту родник установлено, что при различных задаваемых шагах запаздывания максимальный статистически значимый коэффициент корреляции (0,485) между расходами и количеством осадков фиксируется только при шаге запаздывания, равном полгода. Следовательно, суммарные осадки влияют на дебит родников только в ближайшие полгода, в последующем их влияние становится незначительным. Сумма осадков, по данным наблюдений, менялась за полгода для родника от 200 до 425 мм, для скважины от 10 до 120 мм в месяц.

Предварительная подготовка данных для расчетов параметров дифференциального уравнения индивидуальна для разных объектов. Для каждого выделенного периода по роднику считали сумму осадков и среднее значение дебита. Для дальнейших прогнозных расчетов введена характеристика «приращение дебита за полгода», обозначенная  $dQ/dt$ .

Начиная со второго полугодия, считали  $dQ/dt$  как разницу средних значений в текущем полугодии и предыдущем. Получили набор значений суммы осадков за предыдущие полгода и  $dQ/dt$ . Единица времени в расчетах – полгода.

Для описания дебита родника было составлено следующее обыкновенное дифференциальное уравнение (в наиболее простом виде):

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha S + \beta$$

где  $S$  – суммарные осадки за предшествующие полгода; параметры  $\alpha$ ,  $\beta$  – эмпирические константы, определяемые методом наименьших квадратов по данным наблюдений. Величина констант составляет:  $\alpha = 0.000187$  (дм<sup>2</sup> с<sup>-1</sup>) и  $\beta = -0.05542$  (дм<sup>3</sup> с<sup>-1</sup>).

Приравняв к нулю правую часть уравнения, определили величину осадков, разделяющую режимы повышения или понижения дебита родника (на рис. 3 это точка пересечения линиями оси абсцисс). Для родника Бор она составила 296 мм.



**Рисунок 3.** Зависимость приращения дебита (уровня грунтовых вод) от сумм атмосферных осадков за полгода (к уравнению)

Полученные результаты верифицированы по данным уровенного режима скважины 3020, вскрывающей тот же аллювиальный водоносный горизонт на расстоянии 3 км от родника по берегу. Использован период 2001-2003 гг. Анализ данных за 2001-2003 годы показал, что наибольший коэффициент корреляции между уровнем грунтовых вод и суммой осадков наблюдается при 5-6 предшествующих месяцах, что позволило описать приращение среднемесячного уровня грунтовых вод в декаду тем же уравнением.

Для скважины вычислили среднемесячные величины уровня грунтовых вод. Для получения большего числа данных использовали метод скользящего

среднего, со сдвигом на декаду. Аналогично, со сдвигом в декаду, получили набор значений осадков за предшествующие полгода (осадкомер Третьякова установили в 500 м от устья скважины). Таким образом, для скважины  $dQ/dt$  – это изменение среднемесячного значения уровня грунтовых вод в декаду. Единица времени в расчетах – декада.

Методом наименьших квадратов находились эмпирические константы, которые составляют:  $\alpha = 0.000226$  ( $\text{с}^{-1}$ ),  $\beta = -0.0717$  ( $\text{м с}^{-1}$ ). Отсюда следует, что для скважины при сумме осадков менее 316 мм (рис. 3) за предшествующие полгода уровень грунтовых вод будет понижаться, а более – увеличиваться.

Результаты верификации показывают адекватность уравнения и возможность его использования для прогнозирования среднесезонной величины дебита родника на ближайшие полгода.

### ***Анализ динамики гидрохимических характеристик родникового стока***

Поскольку мы не знаем закона распределения величин гидрохимических показателей, используем непараметрические критерии, одним из которых является медианный критерий.

Для обоснования применения гидрологического подхода сопоставим экстремумы дебита родника Бор в 2010-2018 годы (ноябрь – март) и уровень сработки водохранилища (табл. 1).

**Таблица 1.** Динамика экстремальных расходов родника Бор в сравнении со сработкой уровня Ивановского водохранилища (2010-2018)

Дебит, $\text{дм}^3 \text{с}^{-1}$	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18
Минимум	0.082	0.068	0.068	0.046	0.037	0.04	0.042	0.086
Максимум	0.096	0.091	0.091	0.106	0.053	0.048	0.059	0.115
Сработка, м	4.2	4.1	4.2	2.4	1.4	2.2	2.2	3.8

Расчеты показали, что коэффициент корреляции между минимальными расходами и величиной сработки равен 0.91, что статистически достоверно и указывает на связь между водностью года и дебитами родника. Следовательно, массив анализируемых данных можно разбить не только в виде последовательных временных отрезков, но и по водности года.

В табл. 2 представлены результаты обработки гидрохимических данных по хронологическому подходу. Используемая методика (Кобзарь, 2012) сравнивает две группы между собой для выявления значимости различий в группах.

Медианный критерий выявил значимость различий как медианы, так и среднего арифметического во всех исследованных показателях.

Для  $\text{НСO}_3^-$  рассчитали разности статистических характеристик концентраций между двумя группами. Оказалось, что медиана больше во второй группе на 6.0, а среднее значение концентрации в группах отличается лишь на 1.24  $\text{мг дм}^{-3}$ , значит, медианное значение гидрокарбонатов растет быстрее и явля-

ется более чувствительной характеристикой к изменениям внешних условий, что можно отметить и для кальция. Оценить прирост медианного значения в год можно как отношение разности медиан к периоду времени в самой группе.

**Таблица 2.** Медиана и среднее арифметическое основных гидрохимических показателей I и II групп

Компонент	Медиана		Среднее арифметическое за весь период	
	I группа	II группа	I группа	II группа
Ca <sup>2+</sup>	40.00	41.00	40.66	41.22
Mg <sup>2+</sup>	8.54	8.64	8.84	8.94
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	153.00	159.00	155.90	157.14
Cl <sup>-</sup>	2.50	2.30	2.59	2.73

С помощью непараметрического критерия выявлен сдвиг медианного значения концентраций иона гидрокарбонатов и кальция в родниковых водах в сторону повышения. Среднегодовалый градиент составил для гидрокарбонатов 1 мг дм<sup>-3</sup> год<sup>-1</sup>, для кальция – 0.17 мг дм<sup>-3</sup> год<sup>-1</sup>.

На следующем этапе исследований гидрохимические данные статистически обработали по гидрологическому подходу. Результаты представлены в табл. 3.

**Таблица 3.** Статистические характеристики при группировке данных с учетом водности года для выборочных гидрохимических показателей

Характеристики	Маловодные годы (2006-2008, 2010, 2014-2016, 2018), n=145			
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	Ca <sup>2+</sup> /Mg <sup>2+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup> , ммоль/дм <sup>3</sup>	Cl <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>
Минимум	119	20.00/2.44	2.20	0.10
Максимум	189	55.00/19.52	3.87	9.50
Медиана	153	41.00/8.90	2.79	2.50
Среднее	154	40.76/9.07	2.79	2.58
Многоводные годы (2009, 2011-2013, 2017), n=91				
Минимум	134	32.00/0.00	2.10	0.80
Максимум	189	55.00/13.42	3.30	18.00
Медиана	157	40.00/8.54	2.70	2.30
Среднее	156	40.59/8.42	2.73	2.75

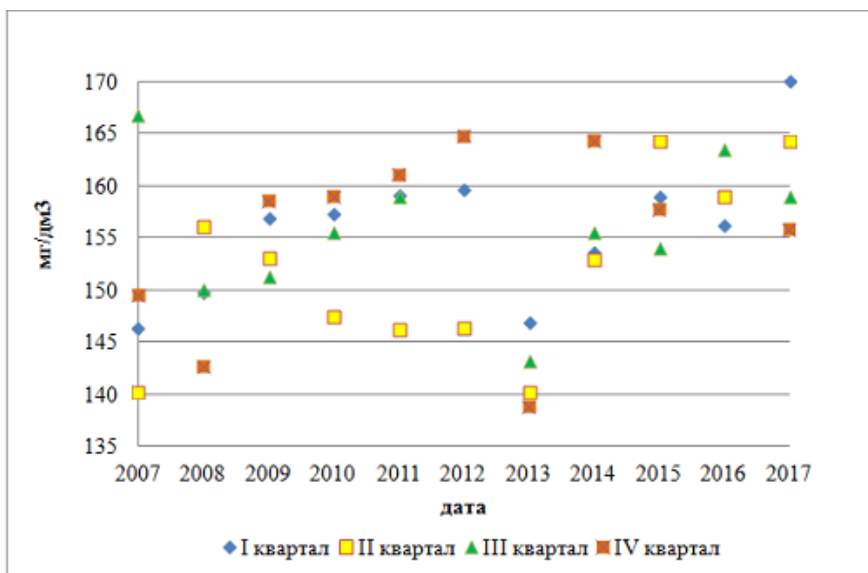
Установлено, что медианное значение концентрации гидрокарбонатов в многоводные годы возрастает, тогда как среднеарифметическое растет в два раза медленнее, что также подтверждает большую изменчивость медианного значения гидрокарбонатов по сравнению со среднеарифметическим.

Для кальция и магния наблюдается небольшое снижение среднеарифметического значения и более значительное – медианного. В отношении хлоридов обнаружен рост среднеарифметического в многоводные годы с одновремен-

ным уменьшением медианного значения, что требует дальнейших исследований. Размах значений гидрокарбонатов, кальция и магния уменьшается, хлоридов – увеличивается.

### ***Внутригодовая динамика концентраций гидрокарбонатов***

Поскольку наибольший тренд выявлен для концентраций иона гидрокарбонатов, рассмотрим динамику его внутригодового хода за весь период наблюдений с целью выявить различия между сезонами. Массив данных разделили по кварталам. На рис. 4 представлена поквартальная динамика концентраций иона за весь период наблюдений.



**Рисунок 4.** Внутригодовой ход (поквартально) концентраций гидрокарбонат-иона на протяжении 2006-2018 гг.

Анализ внутригодовой изменчивости концентраций показал, что существенных различий в трендах не выявлено, за исключением второго квартала (апрель – июнь), когда наблюдались и линейный тренд, и колебательный.

### **Дискуссия**

В работе (Швер, 1984) при изучении осадков предлагается делить годовой период на теплый (с апреля по октябрь) и холодный (с ноября по март) периоды, которые являются неравномерными, но применяются для всей территории Евразии. С учетом региональных особенностей климата мы выделили равномерные отрезки (апрель – сентябрь и октябрь – март).

Зависимость между суммой атмосферных осадков и приращением дебита предлагается описывать дифференциальным уравнением, которое позволяет прогнозировать среднесезонную величину дебита нисходящих родников в береговой зоне Иваньковского водохранилища по сумме атмосферных осадков на ближайшие полгода.



Примененные подходы к разделению данных на группы для кальция и магния дают различные оценки трендов, для гидрокарбонатов – одинаковые, для хлоридов противоречивые. Статистический анализ данных, разделенных в хронологическом порядке, показал, что для кальция и магния существует значимый тренд на повышение, при подходе по водности тренды не обнаружены. Разделение данных одновременно и по времени, и по водности года в данной работе не проводилось.

Медианное значение оказалось более чувствительной характеристикой к изменениям внешних условий, чем среднеарифметическое значение, для гидрокарбонатов и кальция.

Поквартальная обработка данных в оценке трендов по концентрации гидрокарбонатов не выявила существенных различий, кроме второго квартала, в котором, кроме линейного тренда, существует колебательный.

Использование медианного критерия при обработке массива многолетних режимных данных позволило выявить тренд увеличения медианных значений концентраций гидрокарбонатов со скоростью приблизительно  $1 \text{ мг дм}^{-3} \text{ год}^{-1}$ , для кальция –  $0.17 \text{ мг дм}^{-3} \text{ год}^{-1}$ .

*Работа выполнена в рамках темы № 0147-2019-0002 (№ государственной регистрации АААА-А18-118022090104-8) Государственного задания ИВП РАН.*

### Список литературы

Злобина И.Л., Медовар Ю.А., Юшманов И.О. 2017. Трансформация состава и свойств подземных вод при изменении окружающей среды. – М., Изд-во Мир науки. – URL: <http://izd-mn.com/PDF/21MNNPM17.PDF>.

Кобзарь А.И. 2012. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных сотрудников. – М., Физматлит, 816 с.

Ковалевский В.С. 2001. Комбинированное использование ресурсов поверхностных и подземных вод. – М., Научный мир, 332 с.

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

Новиков Ю.В. Ласточкина К.О, Болдина З.Н. 1990. Методы исследования качества воды водоемов.– М., Медицина, 400 с.

Швер Ц.А. 1984. Закономерности распределения количества осадков на континентах. – Л., Гидрометеиздат, 288 с.

Яковлев П.И. 2019. Опыт проведения полевого гидрологического обследования участков рек повышенного подземного притока в Верхневолжском бассейне на территории Тверской области в период 1988-1994 годов. – Ростовский научный журнал, № 9, с. 44-69.

*Статья поступила в редакцию: 04.12.2019 г.*

*После переработки: печать в представленном виде*

---

## FEATURES OF THE FORECAST OF THE DYNAMICS OF SPRING FLOW ON THE COASTAL ZONE OF IVANKOVO RESERVOIR

*E.E. Lapina\*, L.E. Lapina*

Water Problems Institute RAS;  
3, Gubkin str., 119333, Moscow, Russian Federation; \**shtriter\_elena@rambler.ru*

**Abstract.** Ivankovo reservoir is the main source of drinking water supply in Moscow. Its coastal zone, where different types of springs are unloaded, is a barrier (or source) for the entry of pollutants into the reservoir.

The aim of this research is to forecast increments in descending springs water flow and to evaluate trends of hydrochemical indicators (calcium, magnesium ions, hydrocarbonates and chlorine) of springs water quality over 13 years.

The basis of the work are materials of regime observations on reference spring located on the Volga II floodplain terrace, for the period 2006-2018. When processing hydrochemical data in order to compare the results, two approaches were used. One is separation of data array into two groups in chronological order (2006-2012 and 2013-2018), the other – is arrangement according to water content of the year, where the first group is the years of low and medium water content, the second is high.

It is proposed to describe the relationship between amount of precipitation and increment of flow rate by an ordinary differential equation, which will allow to predict the flow rate of the downstream springs of the region using amount of precipitation in increments by the next six months.

The obtained result was verified on groundwater level regime data for the well 3020, drilled on the II floodplain terrace, for the period 2001-2003. The maximum correlation coefficient between the increment of the groundwater level and the amount of precipitation is observed at a similar step. When analyzing the equation, the value of the amount of precipitation was obtained, which separates the mode of increasing or decreasing the flow rate of the spring (groundwater level). For the spring, this figure is 296, for the well – 316 mm.

A statistical analysis of long-term dynamics of the spring runoff hydrochemical components showed that a median value is a more sensitive characteristic to changes in external conditions than an arithmetic average for hydrocarbonates and calcium. An upward direction shift of the median value of bicarbonates and calcium ions concentration in spring waters was revealed when using a nonparametric criterion. The long-term average gradient was  $1 \text{ mg dm}^{-3} \text{ year}^{-1}$  for bicarbonates, and  $0.17 \text{ mg dm}^{-3} \text{ year}^{-1}$  for calcium.

The approaches used to divide the data into groups for calcium and magnesium give different estimates of trends, for hydrocarbons they were the same, for chlorides they are contradictory. Statistical analysis of the data, separated in chronological order, showed that for calcium and magnesium there was a significant upward trend, while with the approach for water availability of year no trends were found.

---

## References

Zlobina V.L., Medovar Yu.A., Yushmanov I.O. 2017. *Transformatsiya i svoystva podzemnykh vod pri izmenenii okruzhayushchej sredy* [Transformation of the composition and properties of groundwater when the environment changes]. Moscow, URL: <http://izd-mn.com/PDF/21MNNPM17.PDF>.

Kobzar' A.I. 2012. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh sotrudnikov* [Applied Mathematical Statistics. For engineers and researchers]. Moscow, 816 p.

Kovalevskiy V.S. 2001. *Kombinirovannoe ispol'zovaniye resursov poverkhnostnykh i podzemnykh vod* [Combined use of surface and groundwater resources]. Moscow, 332 p.

Lapina Ye.Ye., Akhmet'yeva N.P., Kudryashova V.V. 2014. *Rodniki doliny verkhney Volgi i yeye pritokov: usloviya formirovaniya, regim, okhrana* [Springs of the upper Volga valley and its tributaries: formation conditions, regime, protection]. Tver, 256 p.

Novikov Yu.V. Lastochkina K.O., Boldina Z.N. 1990. *Metody issledovaniya vody vodoyoemov* [Methods of researching the quality of water in water bodies]. Moscow, 400 p.

Shver C.A. 1984. *Zakonomernosti raspredeleniya osadkov na kontinentakh* [Regular patterns of rainfall distribution on continents]. Leningrad, 288 p.

Yakovlev P.I. 2019. Opyt provedeniya polevogo gidrologicheskogo obsledovaniya uchastkov rek povyshennogo podzemnogo pritoka v Verkhnevolzhskom bassejne na territorii Tverskoy oblasti v period 1988-1994 godov [Experience in conducting a field hydrological survey of sections of rivers of increased underground inflow in the Upper Volga basin in the Tver region in the period 1988-1994]. *Rostovskij nauchnyj zurnal – Rostov Scientific Journal*, vol. 9, pp. 44-69.