

УДК 551.49

DOI: 10.34753/HS.2022.4.1.93

ОЦЕНКА ПОВЕРХНОСТНОЙ И ПОДЗЕМНОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ РЕЧНОГО СТОКА ПО МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВОДЫ

М.Л. Марков

ФГБУ «Государственный гидрологический институт», г. Санкт-Петербург, Россия
2014mml@gmail.com

ASSESSMENT OF SURFACE AND UNDERGROUND COMPONENTS OF RIVER RUNOFF BY WATER MINERALIZATION

Mikhail L. Markov

State Hydrological Institute, Saint-Petersburg, Russia
2014mml@gmail.com

Аннотация. Оценка генетических составляющих речного стока является одной из актуальных задач, стоящих перед гидрологами и гидрогеологами. Для объективного определения составляющих речного стока (поверхностной и подземной) используются трассеры, к которым относятся изотопные и гидрохимические. Цель статьи оценить возможность определения речного стока и его подземной составляющей на основе данных наблюдений за минерализацией воды. Исследования выполнены по результатам четырёхлетних наблюдений на реке Полометь в Новгородской области. Площадь водосбора реки до расчётного створа в деревне Яжелбицы составляет 631 км², средний многолетний расход воды – 7,7 м³/сек. Для регистрации минерализации использовались в полевых условиях портативные тестеры воды. Измерения проводились с частотой один раз в сутки в период формирования весеннего половодья и дождевых паводков и одно измерение за пять суток в период меженного стока. Результаты исследований позволили выявить устойчивую зависимость минерализации с расходом воды. Среднее отклонение суммарного объёма годового речного стока, рассчитанного по минерализации, от измеренных значений находится в пределах ±10%. Существенное различие минерализации подземных и поверхностных вод (до 180 мг/л) позволило оценить генетические составляющие речного стока. Питание реки Полометь подземными водами, оценённое по минерализации, составляет 40–45% от общего речного стока. Выявлена его внутригодовая динамичность. Результаты

Abstract. The purpose of the article is to evaluate the possibility of determining river runoff and its underground component based on observations of water mineralization. The study was conducted based on the results of four-year observations on the Polomet River in the Novgorod region. The catchment area of the river to the project site is 631 km², the average long-term water consumption is 7.7 m³/sec. Measurements of mineralization by the water tester were carried out with a frequency of once a day during the formation of spring and rain floods and one measurement for five days during low-water runoff. A stable dependence of mineralization on water consumption has been revealed. The error in determining the annual river flow calculated by mineralization is ± 10%. A significant difference in the mineralization of underground and surface waters (up to 180 mg/l) made it possible to evaluate the genetic components of river runoff. The supply of the river with groundwater is 40-45% of the total river flow. Its intra-annual dynamics is revealed. It has been established that the regime information on mineralization allows us to determine the water flow rate in conditions of a significant violation of its connection with the water level due to ice formations, overgrowth of the riverbed, water outflow into the overgrown floodplain, and so on.

исследований показали, что режимная информация о минерализации даёт возможность определять расход воды в реке в условиях, когда невозможно выполнить измерения стандартными методами по технике безопасности, или в условиях существенного нарушения связи расхода с уровнем из-за ледовых образований, зарастания русла, подпора, выхода воды на заросшую пойму и так далее.

Ключевые слова: речной сток; подземная составляющая речного стока; минерализация воды; метод смешения; гидрометрия; атмосферные осадки; расход воды.

Введение

Исследование процессов взаимосвязи поверхностных и подземных вод является одной из актуальных задач, стоящих перед гидрологами и гидрогеологами. Знание пространственно-временных закономерностей формирования подземного питания рек, являющегося частью подземного стока, позволяет оценить роль литогенного звена в глобальных процессах круговорота природных вод, находящихся под дренирующим воздействием водотоков.

С практической точки зрения сведения о подземном питании рек необходимы при оценке ресурсов поверхностных и подземных вод, разработке схем комплексного использования и охраны водных ресурсов, прогнозе их состояния при антропогенном воздействии на водную среду. Возрастающий объем водопотребления приводит к необходимости проектировать комплексное использование водных ресурсов в рациональном сочетании эксплуатации речных и подземных вод с учётом решения острых экологических проблем. Вместе с тем проблема оценки подземного питания рек остаётся одной из самых сложных в гидрологии [Blöschl et al., 2019].

Наиболее полные характеристики взаимодействия речных и подземных вод могут быть получены при проведении комплексных гидрологических и гидрогеологических натуральных исследований. Однако, несмотря на достаточно хорошо разработанные и научно-обоснованные гидрологические и гидрогеологические методы

Keywords: river runoff; underground components of river runoff; water mineralization; mixing method; hydrometry; precipitation; water flow.

изучения взаимодействия речных и подземных вод, вопрос об оценке количественных характеристик подземной составляющей речного стока, особенно в периоды формирования весеннего половодья и дождевых паводков, до настоящего времени не имеет корректного и надёжного решения. Это связано прежде всего с тем, что подземный сток не поддаётся в отличие от речного прямому измерению. Поэтому для объективного определения генетических составляющих речного стока на разных стадиях водного режима в годовом цикле весьма перспективным является применение трассерных методов, к которым, например, следует отнести изотопные методы (третий – ^3H , кислород – ^{18}O , дейтерий – D) и гидрохимические (минерализация – Σ и, кислотность – pH , концентрация кислорода – O_2) [Ферронский, Поляков, 2009; Губарева и др., 2015; и другие].

В последние десятилетия прошлого столетия во многих странах начали широко использоваться изотопные методы оценки доли участия подземных вод в формировании весеннего половодья и дождевых паводков. Результаты таких экспериментальных исследований, которые проводились преимущественно для малых водосборов, показали, что эта доля в указанные периоды гидрологического цикла достигает 60–80% [Коротков, Павлов, 1972; Herrmann, Schoniger, Zavileisky, 1977; Соколов, Завилейский, Марунич,

1994; Sokolov et al., 1995; Соколов и др., 1997; Завилейский, Марунич, Соколов, 2000].

Однако значительное ослабление в начале XXI века концентрации изотопов трития в атмосфере и водах суши снизило эффективность этого метода для исследований формирования речного стока и его подземной составляющей.

Гидрохимические методы уже давно используются в гидрологии для оценки генетических составляющих речных вод [Воронков, 1963; Скакальский, 1966; Яковлев, 2014]. У гидрохимических методов есть существенный недостаток. Они требуют больших затрат на лабораторные химико-аналитические работы. Это, как и у изотопных методов, затрудняет их широкое использование в исследованиях.

В настоящее время существуют сравнительно дешёвые анализаторы воды, которые позволяют в полевых условиях быстро определять различные её физические параметры. Одним из параметров является электропроводность воды. Она зависит от минерализации, а значит может быть индикатором соотношения в питании рек атмосферных осадков (с малой минерализацией) и подземных вод (с высокой минерализацией). Цель статьи – показать возможность применения данных режимных наблюдений за минерализацией речных вод для оценки внутригодового подземного питания рек и общего речного стока. Исследования проведены на реке Полометь.

Объект исследований

Река Полометь расположена в Новгородской области (Валдайский район). Длина её составляет 150 км, площадь бассейна – 2 770 км². Река берёт начало из озера Русское (площадь акватории 2,4 км²) на Валдайской возвышенности. Питание смешанное, с преобладанием снегового, берега высокие, иногда обрывистые, на отдельных участках наблюдается двухсторонняя пойма, затопляемая при высоких уровнях. Преобладающую роль в формировании подземного питания реки играет верхний

водоносный горизонт, водосодержащими породами которого являются пески, супеси и суглинки.

Бассейн реки Полометь является экспериментальным объектом Валдайского филиала Государственного гидрологического института (далее – ВФ ГГИ). На реке и её притоках действуют несколько гидрологических постов. Описываемые в статье исследования проведены на посту, расположенном в деревне Яжелбицы. Площадь водосбора реки до этого поста составляет 631 км², средний годовой расход – 7,7 м³/с.

Результаты исследований

Первый этап исследований проведён в период с 2006 по 2009 год. Для регистрации гидрохимических параметров использовались портативные тестеры, которые позволяют проводить в полевых условиях измерения минерализации (Σ и), кислотности (рН), концентрации кислорода (O₂) и температуры (t°С) атмосферных, речных и подземных вод. Измерения указанных характеристик проводились с частотой один раз в сутки в период формирования весеннего половодья и дождевых паводков и одно измерение за пять суток в период меженного стока. Из полученных данных наблюдений наиболее показательными являются характеристики минерализации воды, которые и были использованы при анализе как гидрохимического, так и водного режима исследуемого водотока и подземных вод в наблюдательной скважине № 3. К сожалению, данная скважина расположена на пойменном участке реки в нескольких метрах от русла и в периоды высоких вод заливается речными водами, что сказывается на её гидрохимических характеристиках. В связи с этим гидрохимические характеристики подземных вод, участвующих в формировании речного стока, использовались в расчётах как по данной скважине в периоды межени, так и по данным наблюдений на воднобалансовых площадках и по режимным наблюдениям на малых водосборах ВФ ГГИ.

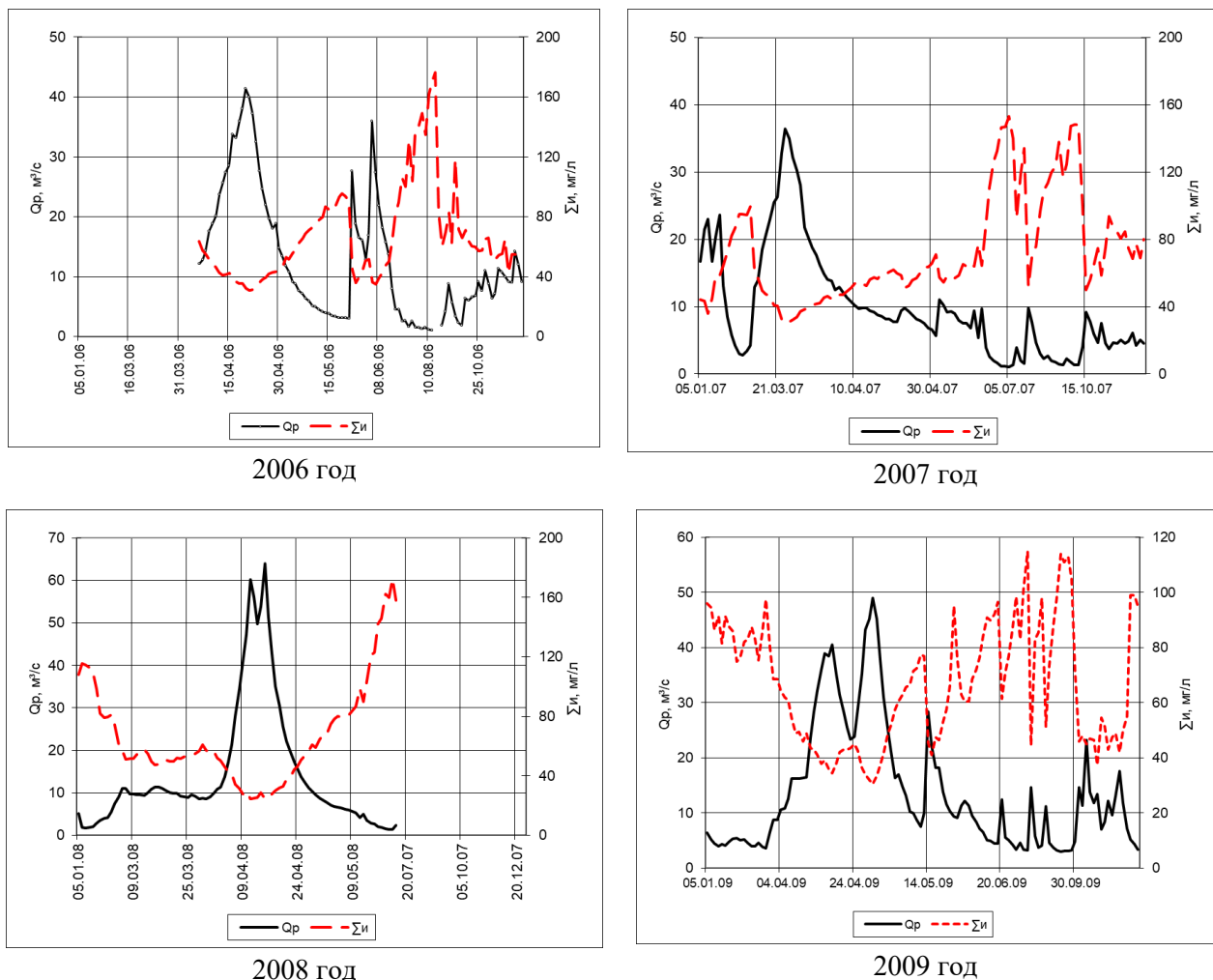


Рисунок 1. Динамика расходов воды и минерализации на реке Полометь – деревня Яжелбицы.

Figure 1. Water flow and mineralization in the Polomet River – Yazelbitsy Village.

Таблица 1. Параметры водного и гидрохимического режима реки Полометь.

Table 1. Parameters of the water and hydrochemical regime of the Polomet River.

Год	2006	2007	2008	2009	Среднее
Период измерения	06.04–31.12	05.01–31.12	05.01–05.07	05.01–25.12	За 4 года
Q min	1,1	1,0	1,3	3,0	1,6
Σи, max	177,0	153,0	173,0	115,0	154,5
Q max	41,4	36,4	64,0	49,0	47,7
Σи, min	31,0	31,0	25,0	31,0	29,5
R ²	0,96	0,96	0,96	0,90	0,95

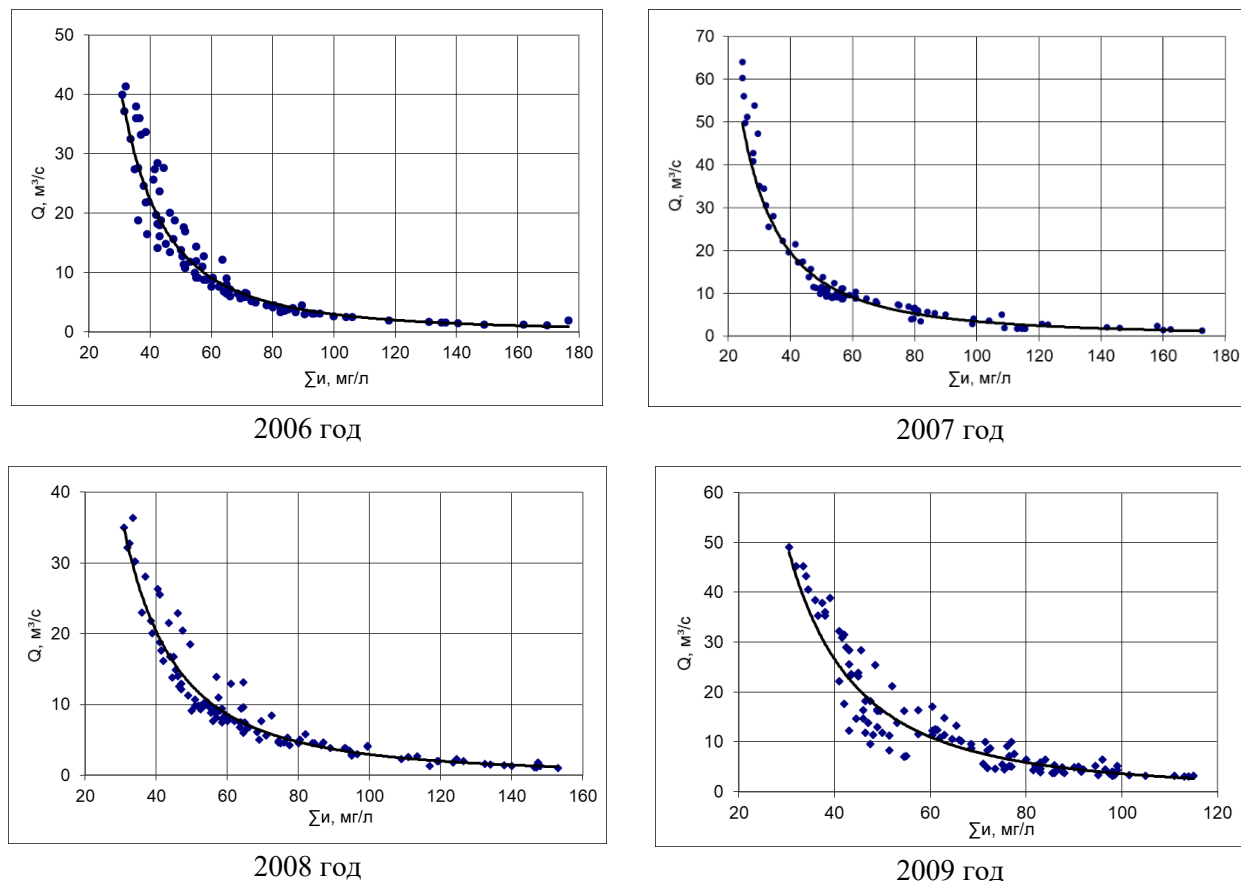


Рисунок 2. Связь расходов воды с минерализацией на реке Полонь – деревня Яжелбицы.
Figure 2. The relationship of water discharge with mineralization in the Polomet River –Yazhelbitsy Village.

На рисунке 1 представлен внутригодовой режим расхода речного стока и его гидрохимических характеристик. Прежде всего, отмечается высокая динамичность изменения и противофазность показаний минерализации речного стока с его гидрографом. Аналогичные характеристики получены для всех четырёх лет наблюдений. Для оценки идентичности полученных результатов были построены графики связи расхода речного стока и его минерализации для рассматриваемых лет наблюдений (рисунок 2). Анализ данных наблюдений показал хорошую связь водного и гидрохимического режимов, на что указывают и коэффициенты R^2 линий трендов (таблица 1).

Приведённые в таблице 1 данные показывают, что для минимальных и максимальных расходов воды наблюдается практически постоянная для четырёх лет величина минерализации речных вод, ориентировочное осреднённое значение которой

составляет соответственно 30 и 150 мг/л. Эти данные в определённой степени были использованы для разработки методов расчёта гидрографов речного стока и его подземной составляющей.

По данным анализа графиков связи расходов речного стока и его минерализации во внутригодовом цикле за четырёхлетний период была получена эмпирическая формула для расчёта гидрографа речного стока реки Полонь – деревня Яжелбицы, которая имеет следующий вид:

$$Q_P = \alpha^{2,25} \cdot \Sigma_{и,t}^{-2,15} \quad (1)$$

где Q_P – расход речного стока на расчётный момент времени, м³/с;

α – коэффициент, равный среднему значению максимальной минерализации речных вод, который для реки Полонь в створе деревни Яжелбицы равен 150 мг/л (таблица 1);

$\Sigma_{i,t}$ – количественная характеристика минерализации на расчетный момент времени t , мг/л.

Таким образом, по зависимости (1) можно провести расчёты ординат гидрографов речного стока на основании только данных о минерализации речных вод без проведения измерения расходов и уровней в наблюдательном створе. Расчёты ординат гидрографов были проведены для 2007 и 2009 годов, как наиболее полных по измерениям минерализации речных вод (таблица 1). Отклонение величины суммарного объёма годового речного стока, рассчитанного по зависимости (1), от его измеренных значений находится в пределах $\pm 10\%$. Пример результатов таких расчётов представлен на рисунке 3.

Анализ расчётных гидрографов, построенных по гидрологическим и гидрохимическим данным, показал их хорошую сходимость. Только в отдельные периоды формирования стока наблюдаются отклонения расчётных и наблюдаемых характеристик. Главным образом эти расхождения, как показал анализ, связаны с нарушением системы наблюдений за минерализацией воды в эти периоды, то есть интервал измерений составлял не одни сутки, а пять. Так же могут влиять и технические погрешности, как приборов, так и методик отбора проб воды. Возможно влияние и антропогенных факторов – поступление в реку загрязнённых стоков с высокой минерализацией с дорог и урбанизированных территорий.

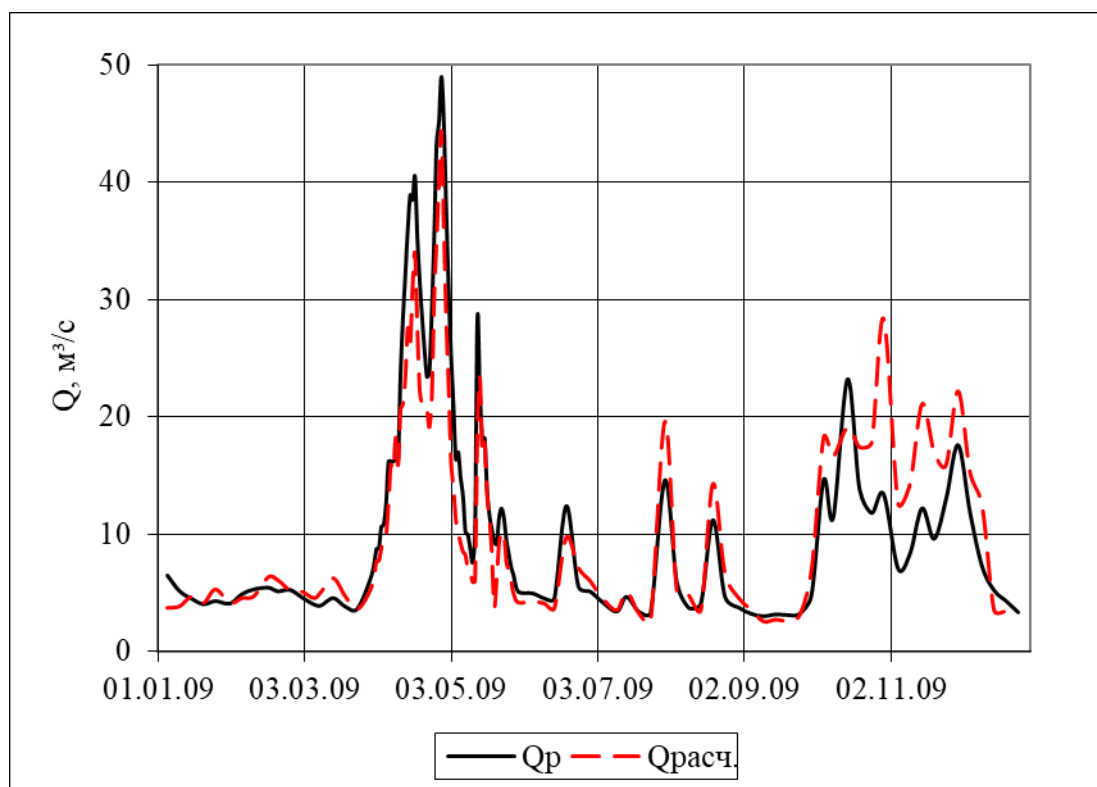


Рисунок 3. Гидрограф стока реки Полометь – деревня Яжелбицы, определённый по связи расхода с уровнем воды (Q_p), расчётный по минерализации ($Q_{расч.}$) (2009 год).

Figure 3. Hydrograph of the flow of the Polomet River – Yazhelbitsy Village, determined by the relation of the flow rate with the water level (Q_p), calculated by mineralization ($Q_{расч.}$) (2009 year).

В гидролого-гидрогеологических расчётах широкое применение получил метод смешения [Коротков, Павлов, 1972]. Применение метода смешения в исследованиях обычно используется при недоступности применения других методов измерения расходов поверхностных или подземных вод. В качестве наиболее употребительного индикатора используется раствор хлористого натрия. Его искусственно вводят в открытый поток или в наблюдательные гидрогеологические скважины и затем, с помощью отбора проб воды в контрольном створе, определяют концентрацию индикатора и по степени его разбавления рассчитывают скорости и расходы потоков. В гидрометрии использование такого метода эффективно при малых скоростях течения водного потока, при малой мощности льда, когда опасно проводить гидрометрические измерения, подпорных явлениях и тому подобное [Юхно, Кулешов, 2021]. Однако использование таких методов на практике носит эпизодический характер.

При применении метода смешения в исследованиях на реке Полометь индикатором служит подземная составляющая речного стока, минерализация которой сформирована её происхождением. По приведённым в таблице 1 данным видно, что при максимальном стоке, который сформирован в основном осадками и склоновыми поверхностными водами, наблюдаются минимальные значения минерализации, порядка $\Sigma_{и} \approx 30$ мг/л при $Q \approx 1,5$ м³/с. Этот показатель минерализации подтверждается и данными измерения поверхностного стока с воднобалансовых площадок ВФ ГГИ ($\Sigma_{и} = 30,8$ мг/л по данным гидрологических ежегодников ВФ ГГИ). Максимальные значения минерализации речных вод по данным таблицы 1 лежат в диапазоне 115–177 мг/л при среднем её значении $\Sigma_{и} \approx 150$ мг/л. Эта величина минерализации, как было указано выше, использовалась при расчётах гидрографа стока по уравнению (1).

Следующая задача исследований заключалась в разработке метода выделения

подземной составляющей в гидрографе общего речного стока.

По результатам анализа данных измерений минерализации в разные фазы гидрологического цикла (весеннее половодье, дождевые паводки, межень) было принято уравнение (2) для расчёта подземной составляющей речного стока. В основу данного уравнения положен принцип баланса вод различных категорий, поступающих к наблюдательному створу: расход воды в реке, приток грунтовых вод и поступление твёрдых и жидких осадков в сочетании с результатами измерения их минерализации.

$$q_{п} = Q_{р} \frac{C_t - C_{ос}}{C_{max} - C_{ос}} \quad (2)$$

где $Q_{р}$ – расход речного стока на расчетный момент времени t , м³/с;

$q_{п}$ – подземная составляющая речного стока на расчетный момент времени t , м³/с;

C_t – минерализация речного стока на расчётный момент времени, мг/л;

$C_{ос}$ – осреднённое значение минерализации твёрдых и жидких осадков, мг/л;

C_{max} – максимальная минерализация речного стока, мг/л.

При расчётах гидрографа подземной составляющей общего речного стока были приняты осреднённые параметры за два полных года наблюдений: 2007 и 2009 годы, которые представлены в таблице 1. В качестве примера подобных расчётов на рисунке 4 приведены гидрографы общего речного стока ($Q_{р}$) и его подземной составляющей ($q_{п}$), рассчитанной по формуле 2.

Для данного примера расчётов в качестве основных параметров принимались значения минерализации речного стока $C_{max} = 115$ мг/л, а для осадков – $C_{ос} = 2$ мг/л (как осредненное значение параметра, за данный период экспериментальных наблюдений 1–3 мг/л). Анализ расчётов по уравнению (2) показал, что общий годовой объем подземных вод составляет 40–45% от общего речного стока (в зависимости от гидрометеорологических условий его формирования).

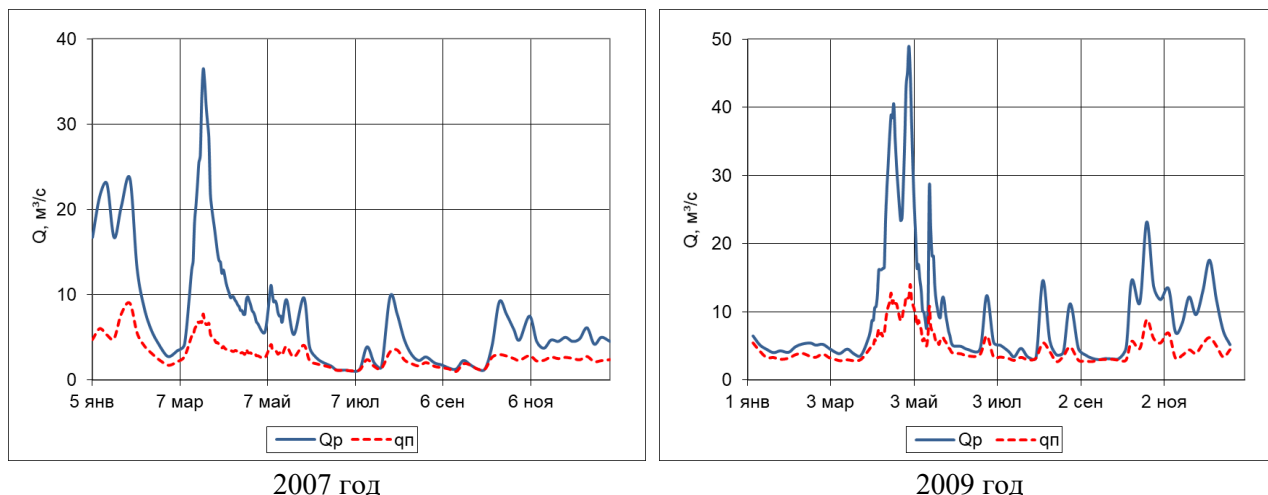


Рисунок 4. Гидрографы речного стока и его подземной составляющей (река Полометь – деревня Яжелбицы).

Figure 4. Hydrographs of the river runoff and its underground component (Polomet River –Yazelbitsy Village).

Заключение

Результаты исследований реки Полометь в створе деревни Яжелбицы показывают, что при большой амплитуде колебаний минерализации воды в реках с естественным гидрохимическим режимом возможно определение стока рек не только по связи расхода с уровнем, но и по связи расхода с минерализацией. Это позволяет определять сток в реке с большей точностью по сравнению с традиционным методом в условиях нарушения связи ($Q=f(H)$) при подпорах, выходе воды на широкие залесённые поймы, зарастании русла, зажорах и других сложных ледовых условиях.

Литература

Воронков П.П. Гидрохимические обоснования выделения местного стока и способ расчленения его гидрографа // Метеорология и гидрология. 1963. № 8. С. 21–28.

Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Болдескул А.Г., Кожевникова Н.К. Разделение гидрографа стока на генетические составляющие // Метеорология и гидрология. 2015. № 3. С. 97–108.

Завилейский С.В., Марунич С.В., Соколов Б.Л. Механизм формирования речного стока на малых водосборах Валдая // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2000. № 2. С. 37–40.

Минерализация в реке является индикатором соотношения основных генетических составляющих речного стока (поверхностной и подземной). При ежедневных наблюдениях за минерализацией может быть выполнена более объективная оценка подземной составляющей по сравнению с традиционным схематичным расчленением гидрографов.

Доля подземной составляющей в речном стоке реки Полометь составляет 40–45% по данным расчётов с учётом динамики минерализации речных вод во внутригодовом цикле.

References

Blöschl G., Bierkens M.F.P., Chambel A., Cudennec Ch., Destouni G., Fiori A., Kirchner J.W., McDonnell J.J., Savenije H.H.G., Sivapalan M., Stumpff Ch., Toth E., Volpi E., Carr G., Lupton C., Salinas J., Széles B., Viglione A., Aksoy H., Allen S.T., Amin A., Andréassian V., Arheimer B., Aryal S.K., Baker V., Bardsley E., Barendrecht M.H., Bartosova A., Batelaan O., Berghuijs W.R., Beven K., Blume Th., Bogaard Th., Amorim P.B.de, Böttcher M.E., Boulet G., Breinl K., Brilly M., Brocca L., Buytaert W., Castellarin A., Castelletti A., Chen X., Chen Y., Chen Yu., Chiffard P., Claps P., Clark M.P.,

Коротков А.И., Павлов А.Н. Гидрохимический метод в геологии и гидрогеологии. Л.: Недра, 1972. 183 с.

Скакальский Б.Г. Основные географические и гидрохимические характеристики местного стока природных зон Европейской территории СССР // Труды Государственного гидрологического института. 1966. Вып. 137. С. 125–180.

Соколов Б.Л., Завилейский С.В., Марунич С.В. Экспериментальные исследования процессов формирования речного стока малых водосборов // Метеорология и гидрология. 1994. № 10. С. 82–91.

Соколов Б.Л., Завилейский С.В., Марков М.Л., Марунич С.В. Новые результаты экспериментального изучения процессов формирования речного стока // Гидравлика и экология: межвузовский сборник научных трудов. Тверь: ТГТУ, 1997. С. 18–34.

Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир, 2009. 632 с.

Южно А.В., Кулешов А.А. Применение метода смешения для измерения расходов воды на малых водотоках // Материалы XVI Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (г. Москва, 1–3 декабря 2021 года). М.: ООО «Геомаркетинг», 2021. С. 257–264.

Яковлев П.И. Определение подземной составляющей речного стока по гидрохимическим данным на примере Верхней Волги на участке от истока до г. Старицы // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2014. № 1 (5). С. 92–109.

Blöschl G., Bierkens M.F.P., Chambel A., Cudennec Ch., Destouni G., Fiori A., Kirchner J.W., McDonnell J.J., Savenije H.H.G., Sivapalan M., Stumpp Ch., Toth E., Volpi E., Carr G., Lupton C., Salinas J., Széles B., Viglione A., Aksoy H., Allen S.T., Amin A., Andréassian V., Arheimer B., Aryal S.K., Baker V., Bardsley E., Barendrecht M.H., Bartosova A., Batelaan O., Berghuijs W.R., Beven K., Blume Th., Bogaard Th., Amorim P.B.de, Böttcher M.E., Boulet G., Breinl K., Brilly M., Brocca L., Buytaert W., Castellarin A., Castelletti A., Chen X., Chen Y., Chen Yu., Chiffard P., Claps P., Clark M.P., Collins A.L., Croke B., Dathe A., David P.C., Barros F.P.J. de,

Collins A.L., Croke B., Dathe A., David P.C., Barros F.P.J. de, Rooij G.de, Baldassarre G.D., Driscoll J.M., Duethmann D., Dwivedi R., Eris E., Farmer W.H., Feiccabrino J., Ferguson G., Ferrari E., Ferraris S., Fersch B., Finger D., Foglia L., Fowler K., Gartsman B., Gascoin S., Gaume E., Gelfan Al., Geris J., Gharari Sh., Gleeson T., Glendell M., Bevacqua A.G., González-Dugo M.P., Grimaldi S., Gupta A.B., Guse B., Han D., Hannah D., Harpold A., Haun S., Heal K., Helfricht K., Herrnegger M., Hipsey M., Hlaváčiková H., Hohmann Cl., Holko L., Hopkinson Ch., Hrachowitz M., Illangasekare T.H., Inam A., Innocente C., Istanbuluoglu E., Jarihani B., Kalantari Z., Kalvans A., Khanal S., Khatami S., Kiesel J., Kirkby M., Knoben W., Kochanek K., Kohnová S., Kolechkina A., Krause S., Kreamer D., Kreibich H., Kunstmann H., Lange H., Liberato M.L.R., Lindquist E., Link T., Liu J., Loucks D.P., Luce Ch., Mahé G., Makarieva O., Malard J., Mashtayeva Sh., Maskey Sh., Mas-Pla J., Mavrova-Guirguinova M., Mazzoleni M., Mernild S., Misstear B.D., Montanari A., Müller-Thomy H., Nabizadeh A., Nardi F., Neale Ch., Nesterova N., Nurtaev B., Odongo V.O., Panda S., Pande S., Pang Zh., Papacharalampous G., Perrin Ch., Pfister L., Pimentel R., Polo M.J., Post D., Sierra C.P., Ramos M.-H., Renner M., Reynolds J.E., Ridolfi E., Rigon R., Riva M., Robertson D.E., Rosso R., Roy T., Sá J.H.M., Salvadori G., Sandells M., Schaepli B., Schumann A., Scolobig A., Seibert J., Servat E., Shafiei M., Sharma A., Sidibe M., Sidle R.C., Skaugen Th., Smith H., Spiessl S.M., Stein L., Steinsland I., Strasser U., Su B., Szolgay J., Tarboton D., Tauro F., Thirel G., Tian F., Tong R., Tussupova K., Tyralis H., Uijlenhoet R., Beek R.van, Ent R.J. van der, Ploeg M.van der, Loon A.F.V., Meerveld I.van, Nooijen R.van, Oel P.R. van, Vidal J.-Ph., Freyberg J.von, Vorogushyn S., Wachniew P., Wade A.J., Ward Ph., Westerberg I.K., White Ch., Wood E.F., Woods R., Xu Z., Yilmaz K.K., Zhang Y. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective. *Hydrological Sciences Journal*, 2019, vol. 64, iss. 10, pp. 1141–1158. DOI: [10.1080/02626667.2019.1620507](https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507).

Rooij G.de, Baldassarre G.D., Driscoll J.M., Duethmann D., Dwivedi R., Eris E., Farmer W.H., Feiccabrino J., Ferguson G., Ferrari E., Ferraris S., Fersch B., Finger D., Foglia L., Fowler K., Gartsman B., Gascoin S., Gaume E., Gelfan Al., Geris J., Gharari Sh., Gleeson T., Glendell M., Bevacqua A.G., González-Dugo M.P., Grimaldi S., Gupta A.B., Guse B., Han D., Hannah D., Harpold A., Haun S., Heal K., Helfricht K., Herrnegger M., Hipsey M., Hlaváčiková H., Hohmann Cl., Holko L., Hopkinson Ch., Hrachowitz M., Illangasekare T.H., Inam A., Innocente C., Istanbulluoglu E., Jarihani B., Kalantari Z., Kalvans A., Khanal S., Khatami S., Kiesel J., Kirkby M., Knoben W., Kochanek K., Kohnová S., Kolechikina A., Krause S., Kreamer D., Kreibich H., Kunstmann H., Lange H., Liberato M.L.R., Lindquist E., Link T., Liu J., Loucks D.P., Luce Ch., Mahé G., Makarieva O., Malard J., Mashtayeva Sh., Maskey Sh., Mas-Pla J., Mavrova-Guirguinova M., Mazzoleni M., Mernild S., Missstea B.D., Montanari A., Müller-Thomy H., Nabizadeh A., Nardi F., Neale Ch., Nesterova N., Nurtaev B., Odongo V.O., Panda S., Pande S., Pang Zh., Papacharalampous G., Perrin Ch., Pfister L., Pimentel R., Polo M.J., Post D., Sierra C.P., Ramos M.-H., Renner M., Reynolds J.E., Ridolfi E., Rigon R., Riva M., Robertson D.E., Rosso R., Roy T., Sá J.H.M., Salvadori G., Sandells M., Schaefli B., Schumann A., Scolobig A., Seibert J., Servat E., Shafiei M., Sharma A., Sidibe M., Sidle R.C., Skaugen Th., Smith H., Spiessl S.M., Stein L., Steinsland I., Strasser U., Su B., Szolgay J., Tarboton D., Tauro F., Thirel G., Tian F., Tong R., Tussupova K., Tyralis H., Uijlenhoet R., Beek R.van, Ent R.J. van der, Ploeg M.van der, Loon A.F.V., Meerveld I.van, Nooijen R.van, Oel P.R. van, Vidal J.-Ph., Freyberg J.von, Vorogushyn S., Wachniew P., Wade A.J., Ward Ph., Westerberg I.K., White Ch., Wood E.F., Woods R., Xu Z., Yilmaz K.K., Zhang Y. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective // *Hydrological Sciences Journal*. 2019. Vol. 64. Iss. 10. Pp. 1141–1158. DOI: [10.1080/02626667.2019.1620507](https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507).

Herrmann A., Schoniger M., Zavileisky S. Abflussbildungsmechanismen am Beispiel kleiner mitteleuropäischer Fest- und Lockergesteins-Einzugsgebiete // *Tagungsband Symposium "Modellierung in der Hydrologie"* (Dresden, 22–24 September 1977). P. 201–213.

Ferronskii V.I., Polyakov V.A. *Izotopiya gidrosfery Zemli [Isotopy of the Earth's hydrosphere]*. Moscow, Publ. Nauchnyi mir, 2009. 632 p. (In Russian).

Gubareva T.S., Gartsman B.I., Shamov V.V., Boldeskul A.G., Kozhevnikova N.K. Genetic disintegration of the runoff hydrograph. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2015, vol. 40, iss. 3, pp. 215–222. DOI: [10.3103/S1068373915030097](https://doi.org/10.3103/S1068373915030097) (Russ. ed.: Gubareva T.S., Gartsman B.I., Shamov V.V., Boldeskul A.G., Kozhevnikova N.K. Razdelenie gidrografa stoka na geneticheskie sostavlyayushchie. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2015, iss. 3, pp. 97–108).

Herrmann A., Schoniger M., Zavileisky S. Abflussbildungsmechanismen am Beispiel kleiner mitteleuropäischer Fest- und Lockergesteins-Einzugsgebiete. *Tagungsband Symposium "Modellierung in der Hydrologie"* (Dresden, 22–24 September 1977), pp. 201–213.

Iukhno A.V., Kuleshov A.A. Primenenie metoda smesheniya dlya izmereniya raskhodov vody na malykh vodotokakh [Application of the dilution method for measuring water discharge of small watercourses]. Materialy XVI Obshcherossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii izyskatel'skikh organizatsii «Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskaniy v stroitel'stve v Rossiiskoi Federatsii» (Moskva, 1–3 dekabrya 2021 goda) [Materials of the 16th All-Russian Conference of prospecting organizations "Prospects for development of engineering survey in Russian Federation" (Moscow, 1–3 December 2021)]. Moscow, Publ. Geomarketing, 2021, pp. 257–264.

Korotkov A.I., Pavlov A.N. *Gidrokhimicheskii metod v geologii i gidrogeologii [Hydrochemical method in geology and hydrogeology]*. Leningrad, Publ. Nedra, 1972. 183 p. (In Russian).

Skakal'skii B.G. Osnovnye geograficheskie i gidrokhimicheskie kharakteristiki mestnogo stoka prirodnykh zon Evropeiskoi territorii SSSR [The main geographical and hydrochemical characteristics of the local runoff of natural zones of the European territory of the USSR] *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta*

Sokolov B., Zavileisky S., Markov M., Marunich S. New results of experimental studies on river runoff formation // Proceeding of the International Symposium (St. Petersburg (Russia), 30 October – 3 November 1995) in 2 parts. Parts 1. UNESCO. Pp. 85–97.

[*Proceedings of the State Hydrological Institute*], 1966, vol. 137, pp. 125–180. (In Russian).

Sokolov B.L., Zavileiskii S.V., Marunich S.V. Eksperimental'nye issledovaniya protsessov formirovaniya rechnogo stoka mal'nykh vodosborov [Experimental studies of the processes of formation of river runoff in small watersheds]. *Meteorologiya i gidrologiya [Russian Meteorology and Hydrology]*, 1994, iss. 10, pp. 82–91. (In Russian).

Sokolov B.L., Zavileiskii S.V., Markov M.L., Marunich S.V. Novye rezul'taty eksperimental'nogo izucheniya protsessov formirovaniya rechnogo stoka [New results of experimental study of river runoff formation processes]. *Gidravlika i ekologiya: mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov [Hydraulics and ecology: interuniversity collection of scientific papers]*. Tver', Publ. TGTU, 1997, pp. 18–34. (In Russian).

Sokolov B., Zavileisky S., Markov M., Marunich S. New results of experimental studies on river runoff formation. *Proceedings of the International Symposium. St. Petersburg (Russia), 30 October – 3 November 1995) in 2 parts. Parts 1.* UNESCO, pp. 85–97.

Voronkov P.P. Gidrokhimicheskie obosnovaniya vydeleniya mestnogo stoka i sposob raschleneniya ego gidrografa [Hydrochemical substantiation of local runoff allocation and the method of dividing its hydrograph]. *Meteorologiya i gidrologiya [Russian Meteorology and Hydrology]*, 1963, iss. 8, pp. 21–28. (In Russian).

Yakovlev P.I. Opredelenie podzemnoi sostavlyayushchei rechnogo stoka po gidrokhimicheskim dannym na primere Verkhnei Volgi na uchastke ot istoka do g. Staritsy [Determination of underground constituent of river runoff according to hydrochemical data by the example of Upper Volga River in the zone from the source to Staritsy town]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Estestvennye nauki [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Estestvennye nauki]*, 2014, iss. 1, pp. 92–109. (In Russian; abstract in English).

Zavileiskii S.V., Marunich S.V., Sokolov B.L.
Mekhanizm formirovaniya rechnogo stoka na
malykh vodosborakh Valdaya [Mechanism of river
runoff formation in the small watersheds of Valdai].
*Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya
Geograficheskaya [Izvestiya Rossiiskoi Akademii
Nauk. Geographic series]*, 2000, iss. 2, pp. 37–40.
(In Russian).