

УДК 556.51.028

DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.183

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ОЦЕНКА ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ СТОКА ЗАБОЛОЧЕННОГО ВОДОСБОРА В БАССЕЙНЕ РЕКИ ЗАПАДНАЯ ДВИНА

Т.С. Губарева¹, Б.И. Гарцман¹,
Л.Е. Ефимова², П.Н. Терский²,
П.А. Белякова¹, А.А. Казачук²

¹Институт водных проблем РАН, г. Москва,
Россия; ²Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва,
Россия

tgubareva@bk.ru

Аннотация. Детальные исследования источников питания и механизмов формирования речного стока стали возможными в последние десятилетия благодаря развитию инструментария гидролого-гидрогеохимического анализа. С использованием трассерной модели смешения (ЕММА) и данных гидролого-гидрохимических съемок уточнены источники питания реки Велеса в бассейне реки Западная Двина и выполнена их оценка. Источниками питания являются: воды валдайского надморенного водно- и озерно-ледникового водоносного горизонта, болотные воды, атмосферные воды. Продемонстрирован специфический характер их сезонной динамики в период с мая 2017 года по июнь 2018 года. Воды надморенного водно- и озерно-ледникового комплекса – значительная и постоянно действующая составляющая речного стока. Их доля в период весеннего половодья 2018 года составила – 21%, а в периоды, следующие за сходом половодья, их доля заметно выше: в 2017 году – 31%, в 2018 году – 38%. Значительная доля атмосферных вод отмечалась в зимний период 2017 года – до 30%, что обусловлено избыточной увлажненностью водосбора в результате выпадения аномальных

IDENTIFICATION AND QUANTIFICATION OF GEOGRAPHICAL WATER SOURCES IN A SWAMP CATCHMENT IN THE ZAPADNAYA DVINA RIVER BASIN

Tatiana S. Gubareva¹, Boris I. Gartsman¹,
Ludmila E. Efimova², Pavel N. Tersky², Pelagia
A. Belyakova¹, Alena A. Kazachuk²

¹Water Problems Institute RAS, Moscow, Russia;
²Lomonosov Moscow State University, Moscow,
Russia

tgubareva@bk.ru

Abstract. Using the mixing model (EMMA) and hydrological and hydrochemical data, the geographical water sources for the Velesa river were identified and their quantitative assessment was made. They are: valdai super-moraine aquatic and lake-glacial aquifer water, swamp water, atmospheric precipitation water. EMMA-model results demonstrate the seasonal dynamics features of water sources in the period May 2017 – June 2018. Water of the super-moraine and lake-glacier aquifer are significant river runoff component constantly operating during year. Its proportion during the spring flood of 2018 is about 20%; its proportion in the periods following the spring flood is higher – in 2017 – 31%, in 2018 – 38%. Significant proportion of atmospheric precipitation waters is observed in the winter period of 2017 – up to 30%, it is due to excessive humidity of the catchment as a result of abnormal liquid precipitation and non-typical meteorological conditions in the first half winter period of 2017. The maximum proportion of atmospheric water (up to 60%) is occur during warm periods after a spring floods in 2017 and 2018. Antecedent watershed moistening and precipitation during the survey periods were the main reasons for the high proportion value. Atmospheric precipitation coming as a result of infiltration into the vadoze zone

жидких осадков и нетипичной метеорологической обстановкой в первой половине зимнего периода 2017 года. Максимальные доли атмосферных вод (до 60%) отмечаются в теплые периоды, после схода весеннего половодья, 2017 и 2018 годах. Предшествующее увлажнение водосбора и осадки в периоды съемок были главными причинами высокой их доли. Атмосферные осадки, поступающие в результате инфильтрации в верхнюю зону аэрации практически без существенной трансформации их химического состава (верховодка), разгружаются в реку подповерхностным путем. Болотные воды преобладали в речных водах во время весеннего половодья – 46%, их доля высока и во время зимнего периода (до 35%), а в периоды начала лета – близки к нулю.

Ключевые слова: источники питания; ЕММА-модель; метод главных компонент; химические трассеры; воды болотных отложений; водосбор; гидрохимические наблюдения.

Введение

Детальные исследования источников питания и механизмов формирования речного стока стали возможными в последние десятилетия благодаря развитию инструментария гидролого-гидрогеохимического анализа. Многочисленные графические, численные (основанные на обработке гидрографа как сигнала) и концептуальные методы (основанные на представлении водосборов как емкостей и анализе кривых истощения) [Pelletier, Andréassian, 2020] расчленения гидрографа неоднократно подвергались критике [Klaus, McDonnell, 2013] и применимы в основном для инженерных расчетов и при массовой обработке рядов. В России основным способом количественной оценки составляющих речного стока является метод разделения гидрографа, предложенный Б.И. Куделиным [Попов, 1968]. Позднее для уточнения подземной составляющей руслового стока активно использовались

without significant transformation of their chemical composition (temporary perched water) is discharged into the river by a subsurface flow path. Swamp water is prevailed in river water during the spring flood – 46%, its proportion is also high during the winter period – up to 35%, and in early summer periods – decline to zero.

Keywords: geographical water sources; ЕММА-model; principal component analysis; chemical tracers; water of swamp deposits; catchment; hydrochemical observations.

гидрологический метод (по минимальным 30-дневным расходам зимней межени) и гидролого-гидрохимические методы [Воронков, 1970; Соколов, Саркисян, 1981; Яковлев, 2014]. Гидролого-гидрохимические методы позволяют снизить погрешности определения подземной составляющей стока в 2 раза, по оценке [Яковлев, 2014]. Существенный прогресс в идентификации и количественном оценивании составляющих стока связан с развитием методики трассерной модели смешения (end-members mixing analysis; далее – ЕММА) [Cristophersen et al., 1990; Cristophersen, Hooper, 1992; Hooper, 2003; Hoeg, 2019]. Данный подход основан на предположении, что гидрохимический состав речной водной массы является результатом смешения отдельных источников или водных масс, циркулирующих в пределах водосбора и обладающих выраженной гидрохимической спецификой. Методика зарекомендовала себя эффективным инструментом не только при анализе и выявлении

геохимической обстановки в бассейне [Bustillo et al., 2010], но и для установления конкретных типов источников питания и оценки их соотношения в речном стоке [Губарева и др., 2015; Rahman et al., 2015; Lv et al., 2018; Chen et al., 2019 и др.].

В общем виде выделяют следующие источники питания: снеговое, дождевое, подземные воды и ледниковое. Такое разделение неплохо подходит для общего представления характера водного режима, преимущественно средних и крупных рек. В пределах небольшого водосбора определяющую роль при формировании речной водной массы могут играть специфические источники питания, такие как почвенные воды, наледные, воды болотных массивов, при этом оценить их вклад и временную динамику прямыми измерениями практически невозможно.

В рамках данной статьи рассматривается применение гидролого-гидрохимического подхода, включающего адаптацию модели смешения методом ЕММА, для выявления и количественного оценивания источников питания стока в пределах небольшого водосбора реки Велеса в бассейне реки Западная Двина. На исследуемом водосборе систематически выполнялись гидролого-гидрохимические съемки на протяжении 2017–2018 годов. Водосбор реки Велеса сильно заболочен и в ранее выполненных исследованиях «определить изменение доли участия болотных вод в речном стоке не представляется возможным» [Вомперский, Сирин, Глухов, 1988]. Возможность количественной оценки вклада болотной составляющей при отсутствии гидрометрических способов представляется перспективной для оценки роли болот в формировании стока рек и составляет новизну исследования.

Характеристика водосбора, имеющиеся оценки источников питания

Река Велеса – левый приток реки Западная Двина, берет начало в юго-западной окраине

Валдайской возвышенности (рисунок 1). Водосбор располагается в зоне смешанных лесов, климат умеренно-континентальный. Диапазон суммы годовых осадков – 550–750 мм. Площадь бассейна по устьевому створу составляет 1 420 км². Важной особенностью бассейна является наличие обширных лесомелиоративных систем, построенных в 1970-х годах [Вомперский, Сирин, Глухов, 1988] с целью экспериментального лесоосушения и изучения его последствий на водный режим и влияния болот на речной сток.

В пределах водосборной площади реки Велеса представлены все основные типы геологического строения подстилающей территории, характерные для российской части водосбора реки Западная Двина: отложения девонской и каменноугольной системы, а также четвертичные отложения, фрагментарно представленные отложениями осташковского оледенения¹.

Верхние горизонты коренных дочетвертичных пород залегают на глубине от 50 до 95 м. Породы представлены известняками, доломитами, мергелями и песчаниками с прослоями голубых и пестроцветных глин. Толща имеет общую мощность 8–100 м и относится к верхнефаменскому ярусу девонской системы. В верхней части бассейна девонское поле сменяется расчлененным уступом так называемого “карбонового плато”, где абсолютные отметки коренного ложа резко увеличиваются до 200–250 м, а мощность четвертичных отложений заметно снижается [Вомперский, Сирин, Глухов, 1988]. С увеличением эрозионного вреза регионального водотока, протекающего в южном направлении, одновременно возрастает мощность четвертичных отложений [Лебедева, 1972].

¹ Геологическая карта дочетвертичных отложений Тверской области. Масштаб 1:500 000. Под ред. Н.И. Сычкина, Е.А. Гаврюшовой, В.В. Дашевского. М.: МПР РФ Центральный региональный геологический центр, 1998.

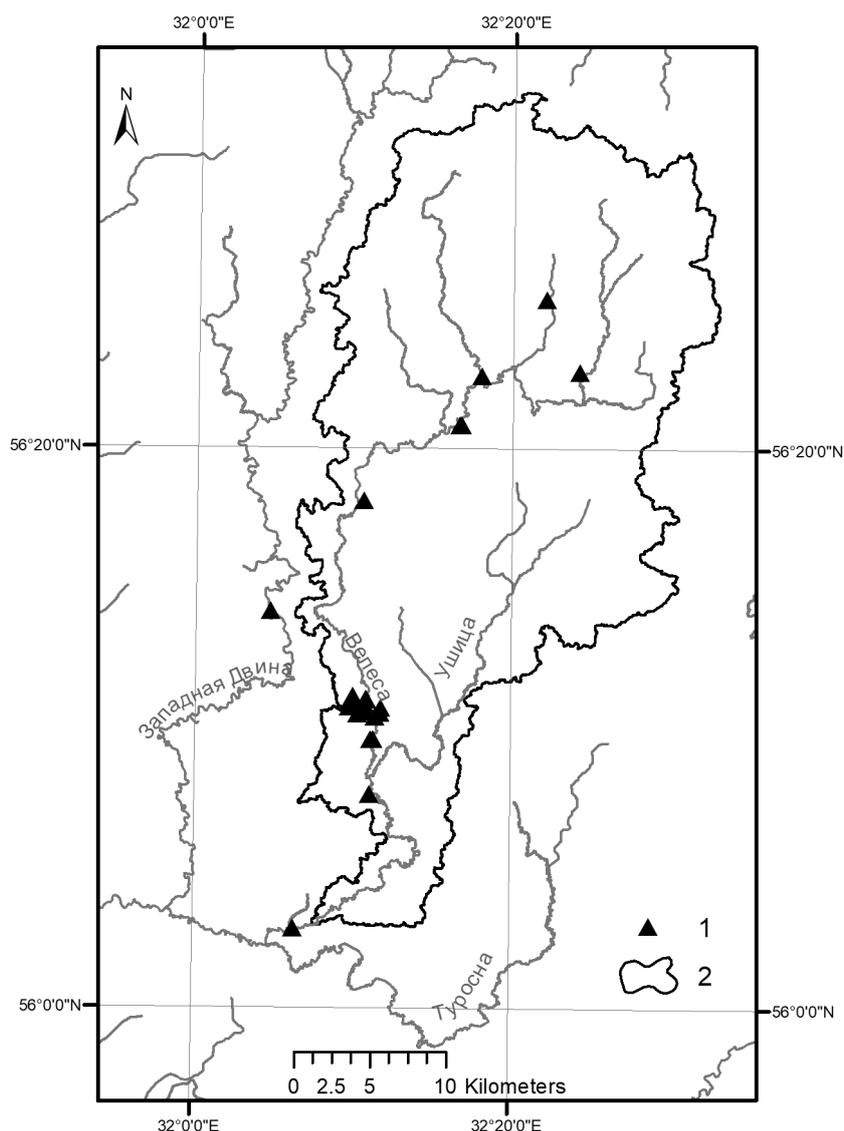


Рисунок 1. Водосбор река Велеса: 1 – точки отбора проб; 2 – границы водосбора.

Figure 1. The catchment area of the Velesa River: 1 – sampling points; 2 – catchment boundary.

Четвертичную толщу слагают в основном ледниковые образования, для которых характерно чередование моренных и межморенных толщ. Моренные толщи представлены валунными супесями, суглинками, песками. В наиболее полных разрезах насчитывается до трех – четырех моренных горизонтов. Они служат относительными водоупорами. Водовмещающие породы обычно межморенные, надморенные или подморенные флювиогляциальные или аллювиальные пески различной зернистости с большим или меньшим содержанием пылевато-глинистых примесей, гравийно-галечный материал с прослоями и линзами супесей, суглинков и глин. Они образуют гидравлически

связанные между собой водоносные горизонты, составляющие единый комплекс мощностью от 5–15 до 80–100 м и более.

Особенность четвертичного покрова и рельефа, созданных в период наступания и деградации ледника, определили, наряду с климатическими предпосылками, возможности и характер начала болотообразовательных процессов, и, по сути, современное сочетание типов болотных ландшафтов.

Согласно оценкам [Лебедева, 1972], выполненным ранее по методу Б.И. Куделина, в формировании подземного питания рек данного района принимают участие водоносные комплексы четвертичных отложений,

представленные Валдайским надморенно водно- и озерно-ледниковым водоносным горизонтом (fgl, lgl Q_{IIIv}) – до 60%, в нижней и средней части бассейна преобладают верхнедевонские комплексы, представленные водами верхнефаменского (хованско-лебедянского) водоносного горизонта (D3fm2) – до 40%.

Водоносный горизонт fgl, lgl Q_{IIIv} является первым от поверхности, за исключением участков, перекрытых торфяниками и аллювиальными отложениями. Преобладающая мощность водовмещающих отложений – 3–10 м, но иногда достигает 20 м и более. Водоупором служат московские и местами валдайские моренные отложения. Воды – безнапорные, гидрокарбонатные кальциевые, слабоминерализованные (0,1–0,7 г/л).

Воды горизонта D3fm2 содержатся в сильно выщелоченных трещиноватых и закарстованных доломитах, известняках и песчаниках, переслаивающихся с мергелями, глинами и алевролитами [Лебедева, 1972]. Воды горизонта пресные с минерализацией 0,3–0,6 г/л, преимущественно гидрокарбонатные магниевые-кальциевые. Водоносный горизонт напорный.

Авторы работы [Вомперский, Сирин, Глухов, 1988] также отмечают, что воды горизонта fgl, lgl Q_{IIIv} – преимущественный источник грунтового питания, и не исключают наличие в долине реки Велеса тесной гидродинамической связи артезианских вод с грунтовыми и поверхностными. При высокой заболоченности бассейна существенную роль в питании реки играют воды болотных массивов. Водовмещающими породами служат торфы различного состава, водно-физические свойства которых сильно различаются в плане и в разрезе.

Описание полевых измерений

Гидрохимическая съемка бассейна (рисунок 1) выполнялась в различные фазы водного режима. Речные воды, воды родников, болотные воды, дождевые воды отбирались в полиэтиленовые бутылки. Пробы снега отбирались в полиэтиленовые пакеты объемом до

5 литров. Температура, pH, удельная электропроводность воды (далее – SPC) измерялись *in situ* с помощью мультипараметрического гидрохимического зонда YSI Professional Plus. Методом капиллярного электрофореза² определялись главные ионы: HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , определение концентрации Si производилось фотометрическим методом согласно [Аналитические..., 2017]. ХПК было определено титриметрически арбитражным методом бихроматного окисления в модификации А.П. Остапени [1965], *цветность* – фотометрическим методом.

Повторные съемки выполнялись на выбранных репрезентативных объектах. *Родник Лагерный* располагается на склоне моренного холма у деревни Мухино и дренирует подземные воды, формирующиеся в пределах валдайского надморенного водно- и озерно-ледникового водоносного горизонта. Мощность напорной камовой морены здесь достигает 40 м [Вомперский, Сирин, Глухов, 1988]. Пробы воды отбирались непосредственно из выхода нисходящего родника.

Пробы склоновых вод, выклинивающихся в пределах слабовыраженной ложбины при выраженном переувлажнении верхнего слоя почвы, представляют приповерхностные склоновые воды, формирующиеся в пределах камовой морены. Пробы воды отбирались непосредственно из почвенной прикопки в месте концентрации воды. Условно этот объект обозначен нами как *родник Смородиновый*.

Болотные воды отбирались из двух мелиоративных каналов осушительных систем, детальное описание и схема расположения, которых даны в [Вомперский, Сирин, Глухов, 1988]. Осушительная система В-5 собирает сток с искусственно созданного водосбора площадью 11 км², занята преимущественно лесными болотами и заболоченными лесами мезо-евтрофного ряда. Небольшая осушительная система В-1 дренирует часть небольшого верхового болотного массива

² Комарова Н.В., Каменцев Я.С. Практическое руководство по использованию систем капиллярного электрофореза «Капель». СПб.: Вода, 2006. 212 с.

центрально-олиготрофного типа, где произрастают основные типы верховых болотных сосняков. Дренаруемая площадь системы В-1 составляет 0,39 км² и представлена сопряженным рядом микроландшафтов: центральная часть – пушицево-кустарничково-сфагновый, а краевая часть – сосняками кустарничково-сфагновыми [Вомперский, Сирин, Глухов, 1988].

Уровень воды реки Велеса измерялся автоматическим логгером Solinst, который был установлен у села Сосвятское в теплый период года (май – октябрь). Сведения о ходе температур воздуха и атмосферных осадков были получены из архива ВНИИГМИ-МЦД³ по наблюдениям на ближайшей метеостанции в городе Торопец. Гидрологические данные об уровнях и расходах воды по гидрологическим постам были получены с сайта АИС ГМВО⁴.

Методика оценивания источников питания речного стока

Метод ЕММА сочетает применение физической модели смешения источников, построенной на принципе сохранения баланса воды и растворенных веществ, и статистическую процедуру анализа – метод главных компонент (далее – МГК) [Christophersen et al., 1990; Christophersen, Hooper, 1992; Hooper, 2003]. Детальное описание модели и расчетные формулы приведены в работе [Губарева и др., 2015]. Адаптация модели выполняется путем построения и анализа диаграмм смешения. Если химический состав речных вод контролируется процессом смешения трех преобладающих источников, диаграмма смешения строится в двухмерном пространстве, где по осям отображаются концентрации двух трассеров. Три вершины, соответствующие концентрациям трассеров в источниках, ограничивают поле смешения треугольной формы, внутри которого заключены точки, соответствующие пробам речных вод. При консервативном смешивании, правильном отборе

трассеров и адекватности выбора источников, пробы речных вод, как правило, оказываются внутри треугольника, образующего пространство смешения. Расчет пропорций водных масс выполняется путем обратного решения системы уравнений модели смешения.

Модель смешения трех источников предусматривает использование двух трассеров, а при гидрохимических съемках определяется большое число показателей (потенциальных трассеров) и заранее неизвестно, какие из них и в какой степени обладают свойствами трассеров. Для генерализации данных и конструирования так называемых «сложных» трассеров применяется МГК [Christophersen et al., 1992], который позволяет сделать это путем проецирования полного набора исходных гидрохимических индикаторов ($>>2$) в подпространство низкой размерности (U -пространство). В U -пространстве каждая главная компонента (далее – GK_i) интерпретируется как сложный модельный трассер и представляет собой линейные комбинации всех исходных гидрохимических показателей. Диаграмма смешения в этом случае строится с использованием первых двух ГК, значения которых используются и при решении модели смешения трех источников.

Качество МГК-модели оценивают долей суммарной дисперсии данных λ_2 , объясненной первыми двумя ГК, и анализом остатков, представляющих собой разницу между рассчитанными по МГК-модели и измеренными концентрациями трассеров. Величина λ_2 , при корректно построенной МГК-модели, должна быть на уровне 90%.

Применение модели смешения предполагает соблюдение некоторых условий: консервативность трассеров; контрастность источников, выраженная в различии их химических характеристик; низкая пространственная вариабельность концентрации трассеров в источниках.

³ Специализированные массивы для климатических исследований [Электронный ресурс]. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/>.

⁴ Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). [Электронный ресурс]. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/>.

Проверка гипотезы консервативности каждого потенциального трассера выполняется на основании анализа линейности связи между измеренными значениями химического показателя и остатков, рассчитанных по МГК-модели [Hooper, 2003]. Для принятия гипотезы консервативности распределение остатков должно представлять собой случайный нормально-распределенный «шум». Валидация модели смещения выполняется путем сопоставления расчетных концентраций трассеров каждой пробы по модели смещения и фактически измеренных концентраций. Тесная корреляция между ними указывает на адекватность и достаточную точность модели. Методика и примеры ее применения для горных залесенных водосборов детально изложены в работе [Губарева и др., 2016].

Результаты и обсуждение

Характеристика гидрометеорологических условий

Анализируемый период с мая 2017 года по июнь 2018 года в целом характеризуется повышенной увлажненностью. Годовая сумма атмосферных осадков в 2017 году составила 912 мм при среднегодовом их количестве 755 мм. Влажными и прохладными выдались конец весны и два первых летних месяца (температуры воздуха были ниже нормы на 2,2–2,5°C, а количество осадков превышало норму до 40%), а также октябрь. В результате на реке Велеса шли частые паводки, летняя межень почти отсутствовала. В период с декабря 2017 года по январь 2018 года наблюдались зимние паводки, вызванные частыми оттепелями и обильными осадками, в том числе в виде дождя. В этот период выпало 171 мм осадков, что в 1,5 раза выше среднемесячных сумм. Зимняя межень и устойчивый ледостав отмечались во второй половине февраля по конец марта 2018 года. Весеннее половодье 2018 года прошло в средние сроки с максимальными уровнями в середине апреля и было средним по водности.

Анализ гидрохимических данных

Обобщенные результаты химического анализа по группам вод приведены в таблице 1, а основные различия в соотношении главных ионов в исследованных образцах генетических типов вод представлены на диаграмме Пайпера (рисунок 2). Речные воды, отобранные из русла реки Велеса выше деревни Рудня, относятся к гидрокарбонатному классу с минерализацией, изменяющейся в диапазоне от 80 до 252 мг/л. В верховьях реки отмечается снижение минерализации русловых вод до значений не ниже 180 мг/л. В анионном составе преобладает HCO_3^- – 70–100%-экв, а в катионном – Ca^{2+} (50–90%-экв) при малом содержании SO_4^{2-} – 1–20%-экв и Cl^- – 1–30%-экв (рисунок 2). В меженный период отмечается увеличение минерализации до 200 мг/л и выше. При адаптации модели смещения пробы воды, отобранные в различных точках по реке Велеса, объединены в одну выборку в виду незначительного изменения гидрохимического состава, обусловленного не сменой режима питания, а случайными факторами.

Пробы склоновых вод (родник Смородиновый) имеют невысокую минерализацию 34–67 мг/л. Преобладающим катионом является Mg^{2+} – 40–60%-экв, а среди анионов отмечается тенденция повышения содержания Cl^- – 20–40%-экв и понижения HCO_3^- – 80–60%-экв. Низкая минерализация склоновых вод свидетельствует об их атмосферном генезисе и слабой степени химической денудации.

Безнапорные воды из родника Лагерный, формирующиеся в пределах моренного холма, преимущественно нейтральные, при сравнении с пробами других объектов имеют более высокие значения pH и минерализацию 400–600 мг/л, содержание HCO_3^- составляет более 90%-экв (рисунок 2), при малом содержании SO_4^{2-} – <5%-экв и Cl^- – <5%-экв, а преобладающим катионом является Ca^{2+} – 60–70%-экв.

Таблица 1. Химический состав природных вод в бассейне реки Велеса; n – число проб. В числителе указан диапазон измерений, в знаменателе – среднее арифметическое значение.

Table 1. The chemical composition of natural waters in the Velsa river watershed; n – number of samples. The numerator indicates the measurement range, and the denominator indicates the arithmetic mean.

Место отбора проб	n	pH	СПС, мсм/см	Цветность, град.	Σ_i	ХПК	Si	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	мг/л	
Водотоки																
река Велеса (рабочий створ)	21	6,30–8,26 7,36	62,8–280 206	30–265 110	86–224 169	13,7–60,8 33,2	0,6–5,5 2,9	30,3–155 114	2,1–7,8 5,1	1,3–8,3 3,3	7,8–46,1 33,2	1,5–9,5 6,1	0,5–4,5 2,0	0,1–4,5 1,1		
река Велеса (верхний участок)	10	6,59–8,40 7,39	51,8–266 166	25–254 151	78,1–267 147	9,8–59,8 39,4	1,01–4,60 3,1	27,5–194 100	1,1–11,9 5,5	0,3–5,4 2,2	10–50,1 26,1	1,8–10,9 5,7	1,4–5,2 3,00	0,5–1,9 1,2		
ручей Дорожный	15	7,00–8,10 7,78	230–402 323	25,0–150 49,1	155–318 271	7,1–59,8 21,2	0,9–5,45 3,68	136–224 192	3,6–21 11,2	1,1–4,2 2,8	37,3–62,1 50	8,4–24,1 13,1	0,1–7,0 3,8	0,3–3,0 1,5		
ручей Ветреничный	4	7,45–8,18 7,75	228–401 321	17,3–62,1 32,6	267–318 297	7,3–18,6 10,7	3,2–4,1 3,6	190–231 208	3,4–21,9 12,2	1,0–5,3 3,8	46,7–65,1 54,7	10,7–18,6 14,0	1,4–3,2 2,2	0,6–1,6 1,1		
ручей Хвощовый	3	7,30–8,01	192–260	45,8–50,9	211–235	45,8–50,9	2,77–3,57	135–164	10,7–18	1,7–2,3	42,1–48,1	7,9–9,8	0,8–1,9	0,4–0,9		
ручей Белейка	6	6,48–7,62 7,30	224–376 328	149–251 191	206–308 271	33,6–82,9 53,3	3,4–5,7 4,5	143–215 187	3,4–12,4 8,6	1,8–8,0 5,4	37,1–66,1 56,1	7,8–12,4 9,6	0,5–7,2 3,3	0,1–3,3 1,2		
ручей б/н (Острожки)	7	6,38–8,17 7,41	70–325 209	10–253 147	98,8–270 187	7,1–84,6 36,6	3,0–6,3 4,91	33,1–181 123	2,8–12,2 7,7	1,5–5,5 3,6	23,8–56,1 36,2	2,1–9,7 6,2	1,3–4,5 3,2	0,7–1,4 1,0		
ручей Болотный	8	5,90–7,73 7,16	61–305 241	85,5–176 107	23,3–25,2 196	20,7–120 42,8	1,2–3,86 3,41	9,7–179,4 138	1,5–6,9 4,48	1,5–4,0 2,41	3,9–48,9 37,5	1,5–12,4 8,65	1,0–4,2 2,57	0,6–2,7 1,33		
Родники и склоновые воды																
Лагерный	6	7,18–7,77 7,59	498–703 625	11–29,5 2,4	397–606 532	3,7–22,1 10,2	4,8–6,6 6,1	295–497 398	1,9–19,4 11,1	0,9–4,8 3,6	65,1–108 93,6	14,8–34 20,8	1,4–15 7,1	0,7–5,3 2,7		
Смородиновый	5	6,7–6,9 6,8	52,2–100 64,1	65–74,3 69,4	34,8–66,8 44,1	15,2–34,4 22,2	2,1–5,0 2,8	17,5–50 26,7	0,6–6,1 4,3	0,4–3,1 1,4	5,2–10,4 6,80	1,5–3,2 2,3	1,1–2,1 1,7	0,5–1,1 0,8		
Мелиоративные каналы (сток с болот)																
В-1	4	3,77–3,92 3,82	7,52–16,5 12,0	598–630 612	2,1–9,0 4,4	160–196 177	1,1–1,8 1,6	0–1,2 0,3	0,5–1,5 1,0	0,5–2,0 1,0	0,3–2,8 1,0	0–0,1	0,2–0,8 0,4	0–1,5 0,6		
В-5	8	6,39–7,98 7,06	146–321 250	200–345 266	118–265 209	43,2–98,5 62,7	0,4–6,3 4,0	78,6–196 161	0,8–3,5 2,5	0,5–3,4 1,4	21,4–49,9 40,4	3,3–12,4 8,6	0,5–2,7 1,9	0,1–1,1 0,8		
Атмосферные осадки																
снег	2	5,30–5,72	7,2–9,6	3–5	3,7–4,1	5,32–11,4	0,37–0,42	1,5	0,5–0,9	0,5–0,5	0,2	0,1	0,2–0,6	0,2–0,4		
дождь	2	5,89–5,98	28,1–31,9	5	9,5–17,9	1,28–16,4	0,1	2,89–5,40	1,4–4,2	0,1–2,3	0,68–1,85	0,3–0,9	0,7–2,1	0,3–1,1		

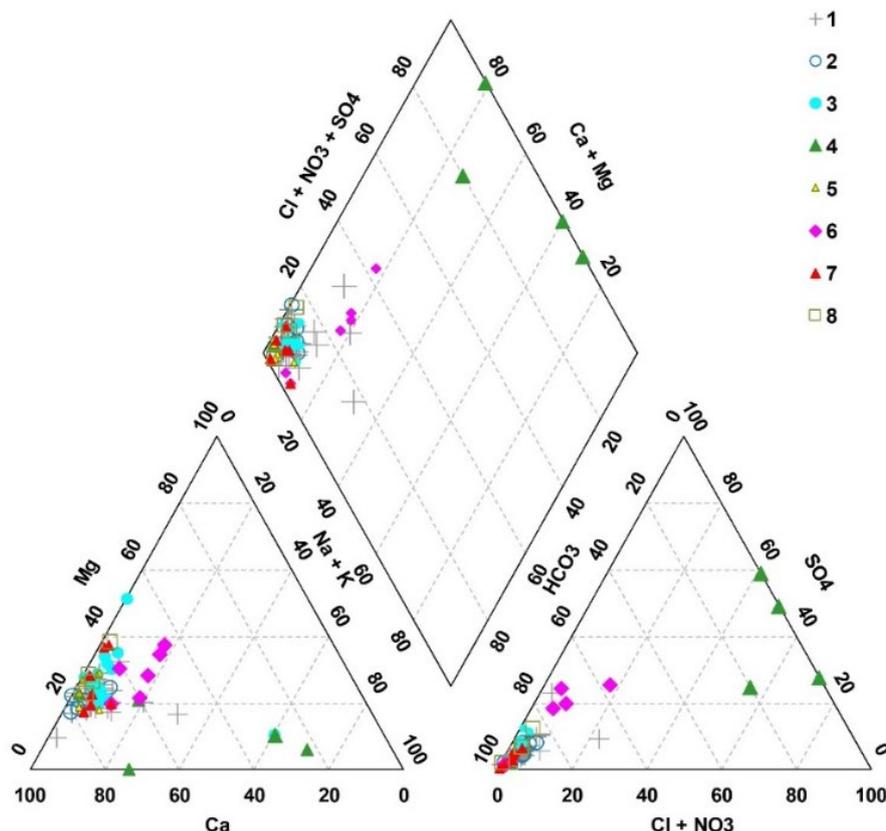


Рисунок 2. Диаграмма Пайпера, показывающая соотношения основных ионов, в %-экв:

1 – река Велеса; 2 – река Белейка; 3 – ручей Дорожный; 4 – канал В-1; 5 – канал В-5;
6 – родник Смородиновый; 7 – родник Лагерный; 8 – ручей Ветреничный.

Figure 2. Piper diagram showing ratios of major ions, in %-eq.

1 – Velsa river; 2 – Beleika river; 3 – Dorozhny stream; 4 – B-1 drain channel; 5 – B-5 drain channel;
6 – Smorodinovy spring; 7 – Lagerny spring; 8 – Vetrenchny stream.

Воды, отобранные из мелиоративной системы В-5, – пресные, имеют нейтральную реакцию. По содержанию главных ионов, кремния, минерализации эти воды подобны химическому составу естественных водотоков, а по показателю цветности и ХПК в них заметно выше. Эти признаки указывают, что в пределах этой мелиоративной системы питание водотока смешанное – присутствует “чистая” болотная составляющая, богатая органическими веществами, и грунтовая, обогащающая воду минеральными соединениями.

Болотные воды магистрального канала В-1 заметно отличаются по химическому составу от других поверхностных вод (таблица 1). Вода ультрапресная, кислая. Низкая минерализация свидетельствует об исключительном атмосферном генезисе этих вод. Другой отличительной их чертой является высокое

содержание органических веществ. В пробах воды из канала В-1 величина ХПК в 3–16 раз превышает значения речных вод.

Между отдельными гидрохимическими показателями отмечаются статистически значимые связи (рисунок 3). Тесные линейные взаимозависимости ($R^2 \geq 0,7$) демонстрируют такие пары характеристик как $SPS - HCO_3^-$, $SPS - Ca^{2+}$, $SPS - Mg^{2+}$, $HCO_3^- - Mg^{2+}$. Менее выражены зависимости для пар ХПК – Mg^{2+} и ХПК – HCO_3^- (R^2 составляет 0,5–0,6). Наиболее слабая связь отмечается для пары $SO_4^{2-} - ХПК$. Детальный ее анализ показывает, что нарушение вызвано двумя экстремальными значениями концентрации сульфатов, зафиксированных в пробах воды из верхнего течения реки Велеса. Не исключено, что подобные «выбросы» являются либо ошибкой лабораторного анализа, либо ошибкой отбора проб. Удаление двух

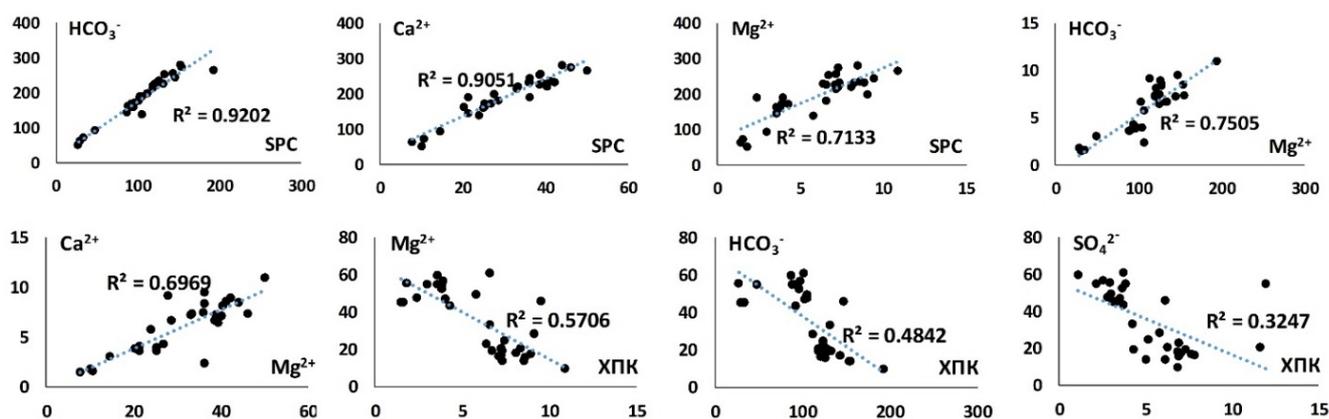


Рисунок 3. Парные зависимости между гидрохимическими показателями.

Figure 3. Relationships between pairs of hydrochemical indicators.

экстремальных значений из выборки приводит к повышению тесноты связи до 0,74. Ввиду ограниченности массива исходных данных было принято решение не исключать эти пробы из расчетов, а учитывать эти отклонения при анализе результатов.

На основе приведенного анализа показатели HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , ХПК, СПС предварительно отобраны как потенциальные трассеры.

Результаты моделирования

Адаптация модели смешения была выполнена с использованием семи трассеров, гипотеза консервативности которых подтверждается случайным характером связи остатков (по МГК-модели) – с измеренными значениями (рисунок 4). Этот набор включает химические показатели, отобранные по тесноте и линейности взаимных связей (представлены в предыдущем разделе), и показатель Si, добавленный по опыту предыдущих исследований. Величина λ_2 для МГК-модели, построенной по матрице гидрохимических данных (31 проба речных вод), составляет 84%. Учитывая ограниченный объем и характер гидрохимических данных, величину объясненной дисперсии можно считать вполне приемлемой.

Диаграмма смешения была построена в пространстве главных компонент (U -пространстве), путем проецирования всех

речных проб и проб предполагаемых источников (рисунок 5). Пробы источников и малых водотоков представлены в диаграмме средними значениями. На диаграмме смешения отчетливо заметны краевые источники (end-members), которые ограничивают поле речных проб: осредненная выборка проб родника Лагерный (пункт 7 легенды рисунка 5); выборка проб из канала В-1 (пункт 11); проба дождевых осадков (пункт 16). По расположению на диаграмме смешения источника родник Лагерный и его гидрохимическим характеристикам этот компонент речного стока можно интерпретировать как подземные воды надморенного водно- и озерно-ледникового водовмещающего горизонта. Его отличительные химические черты по [Лебедева, 1972] – повышенная минерализация до 700 мг/л, большее содержание ионов HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} и невысокое содержание органических веществ (до 10 мг $\text{O}_2/\text{л}$ по ХПК).

Химический состав источника, представленного пробами из канала В-1, имеет существенные отличия от других – высокую степень концентрации органических веществ (максимум ХПК достигает 196 мг $\text{O}_2/\text{л}$, цветность – 630 град.), низкую минерализацию вод (<10 мг/л). Место отбора проб, безусловно, указывает на генезис этой водной массы и интерпретируется как болотная составляющая речного стока.

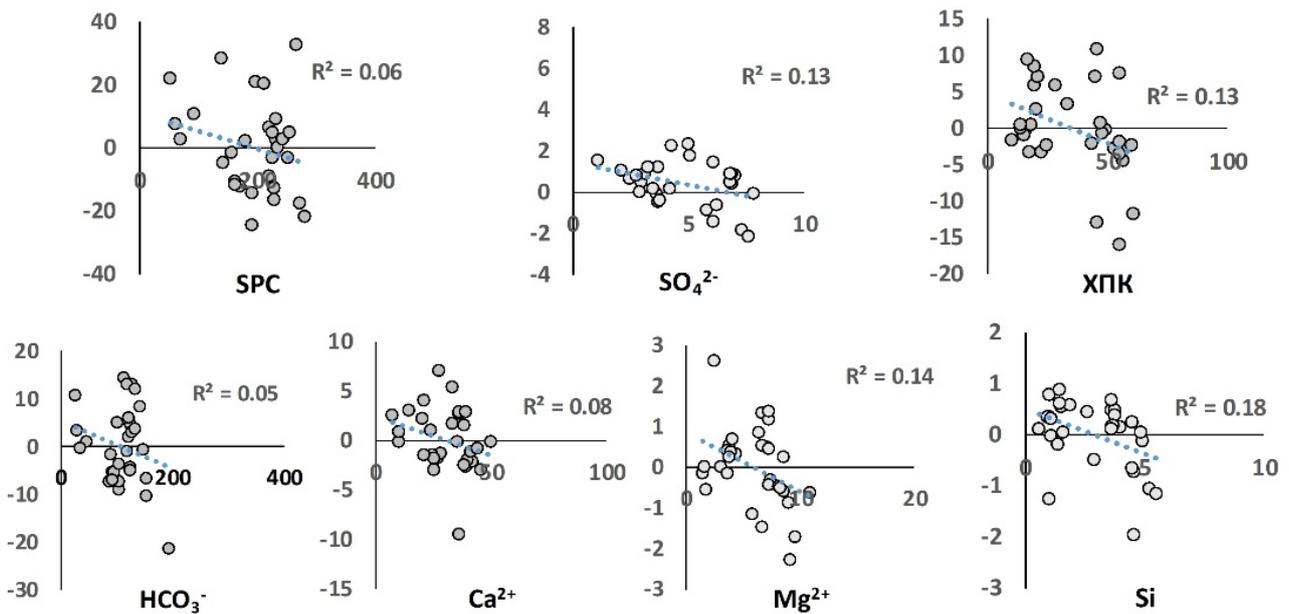


Рисунок 4. Зависимости «остатки – измеренные значения» по каждому трассеру.
Figure 4. «Residuals – measured values» dependencies for every tracer.

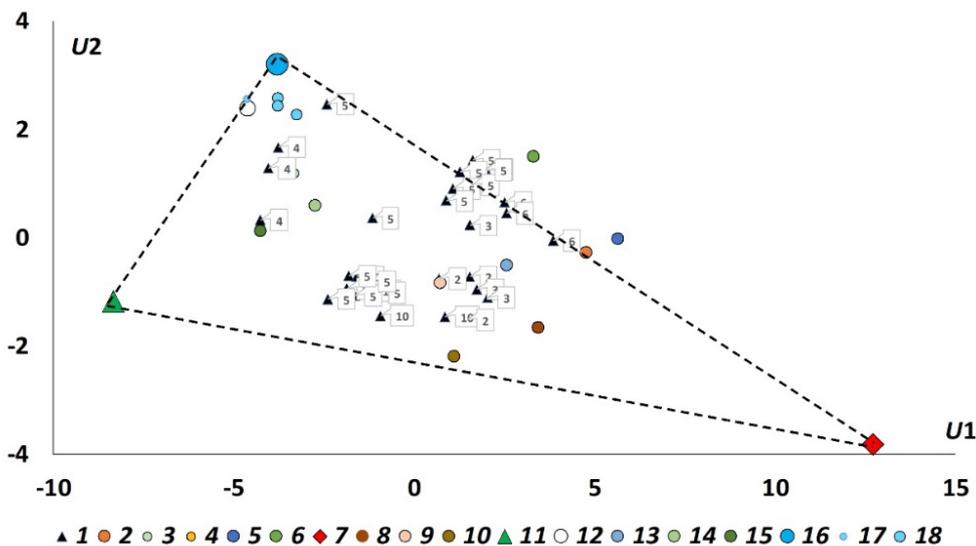


Рисунок 5. Диаграмма смешения вод р. Велеса в U-пространстве.

1 – речные пробы реки Велеса; пробы потенциальных источников: 2 – ручей Дорожный; 3 – родник Смородиновый; 4 – ручей Болотный; 5 – ручей Ветреничный; 6 – ручей Хвощовый; 7 – родник Лагерный; 8 – река Белейка; 9 – ручей у деревни Острожки; 10 – канал В-5; 11 – канал В-1; 12 – снег; 13 – родник Левый Борт; 14 – колодец (деревня Мухино); 15 – мочажина; 16 – 18 – осадки (Сосвятское, Красновидово, Истра). Номера в выносках – месяц отбора проб.

Figure 5. Water mixing diagram of the Velsa River in U-space.

1 – Velsa river samples; potential sources samples: 2 – Dorozhny stream; 3 – Smorodinovy spring; 4 – Bolotny stream; 5 – Vetrenichny stream; 6 – Khvoshchovy stream; 7 – Lagerny spring; 8 – Beleika river; 9 – stream near the Ostrozski village; 10 – drain channel В-5; 11 – drain channel В-1; 12 – snow; 13 – Levyi Bort spring; 14 – well (Mukhino village); 15 – hollow; 16 – 18 – precipitation (Sosvyatskoe, Krasnovidovo, Istra). The numbers in the callouts are the month of sampling.

Третий источник представлен пробой атмосферных осадков, отобранной в бассейне реки Велеса (рисунок 5). К нему тяготеют и пробы снега (пункт 12 легенды). Химический состав этих проб сходен и имеет атмосферный генезис. Реакция атмосферных вод – нейтральная, им характерна низкая минерализация (около 10 мг/л) и низкая концентрация органических веществ (1–16 мг О₂/л по ХПК). Для подтверждения на диаграмму смешения спроецированы пробы атмосферных осадков, отобранных в пределах Истринской воднобалансовой станции. В *U*-пространстве они также располагаются в непосредственной близости к выбранной вершине.

На диаграмме смешения речные пробы образуют отдельные группировки и тяготеют к различным источникам. Эта закономерность обусловлена изменением химического состава речных вод, в том числе и вследствие изменения соотношения источников питания. Так, речные пробы, отобранные в апреле (на фазе половодья), тяготеют к стороне треугольника, соединяющего

болотный и атмосферный источники (рисунок 5), и находятся в непосредственной близости к снеговой пробе. Группа проб, отобранных в холодный период года (октябрь – март), тяготеет к подземному источнику.

Вычисление долей источников в каждой пробе речного стока выполнено путем обратного решения модели смешения, что позволило схематично представить их динамику по датам измерений (рисунок 6) и охарактеризовать их сезонные изменения (таблица 2).

Обсуждение результатов моделирования

Стабильный подземный источник, интерпретируемый как валдайский надморенный водно- и озерно-ледниковый водоносный горизонт, обеспечивает питания речных вод реки Велеса на 20% – в половодье, до 38% – в периоды межени. Это согласуется с выводом о значительной доле этого водоносного горизонта в питании рек, полученным путем анализа гидрогеологического профиля района [Вомперский, Сирин, Глухов, 1988].

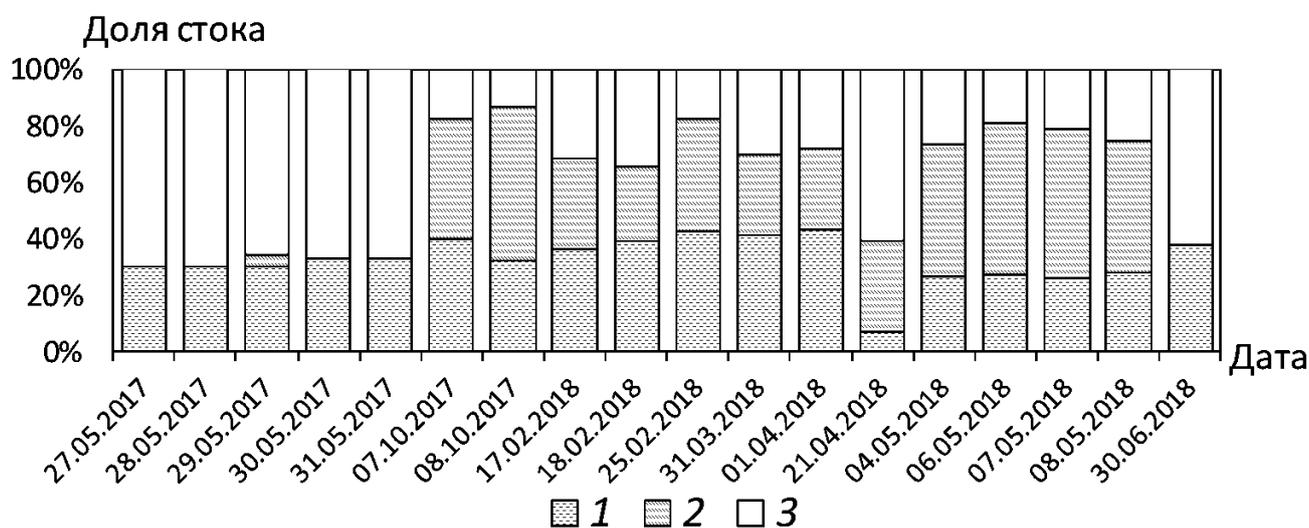


Рисунок 6. Динамика составляющих стока реки Велеса, рассчитанная по ЕММА-модели на каждую дату отбора пробы: 1 – воды валдайского надморенного водно- и озерно-ледникового водоносного горизонта; 2 – воды болотных отложений; 3 – воды атмосферных осадков.

Figure 6. Runoff components dynamics of the Velesa River for each sampling date, calculated by the ЕММА-model: 1 – waters of the Valdai supramoraine aquifer and lacustrine-glacial aquifer; 2 – waters of bog deposits; 3 – atmospheric precipitation water

Таблица 2. Доли (%) составляющих речного стока в характерные периоды года.**Table 2.** Proportions (%) of river runoff components in distinctive year periods.

Составляющие речного стока	Весна 2017	Зимние паводки и межень 2017–2018	Весеннее половодье 2018	Лето 2018
	3 декада мая	Сентябрь – март	Апрель – май	3 декада июня
Воды валдайского надморенного водно- и озерно-ледникового водоносного го- ризонта	31	38	21	38
Воды болотных отложений	2	35	46	0
Воды атмосферных осадков	67	28	33	62

В работе [Вомперский, Сири, Глухов, 1988] также отмечается и существенная роль болотных вод в питании рек. Согласно модели смещения болотная составляющая речных вод оценивается в зимний период – 35%, а в половодный период 2018 года – 46%. В измеренный летний период (июнь) болотные воды не участвуют в формировании стока. На первый взгляд такие результаты кажутся преувеличенными. Однако ряд публикаций по анализу водного режима болот [Лавров, Калюжный, 2012; Калюжный, Лавров, Романюк, 2012; Харанжевская, Синюткина, 2017; Батуев, Калюжный, 2020] косвенно подтверждает диапазон оценок – в последние годы наблюдается увеличение зимнего речного стока, в том числе и из болотных массивов. К основным факторам, регулирующим соотношения зимнего и весеннего стока [Калюжный, Лавров, Романюк, 2012], относят: вследствие уменьшения глубины промерзания деятельного слоя, участие в стокоформировании части воды, ранее консервировавшейся в замерзшем слое; слои воды, образовавшиеся при фазовых переходах во время оттепелей; миграция влаги к фронту промерзания, которая происходит при понижении уровня грунтовых вод в холодный период года.

Нетипичная гидрометеорологическая ситуация в осенне-зимний период на реке Велеса, сопровождающаяся обильными жидкими осадками и частыми оттепелями, очевидно, привела к избыточному наполнению болотного массива атмосферными водами и повышенному дренажу в речную систему.

Главной причиной уменьшения стока с верховых болотных массивов вплоть до полного его прекращения в меженные периоды теплого периода года является снижение уровня грунтовых вод до границы деятельного слоя и ниже [Павлова, Субоч, 1968]. Можно только предположить, что отсутствие болотной составляющей в стоке реки Велеса в мае 2017 года и в июне 2018 года (таблица 2) обусловлены аналогичной ситуацией. Очевидно, что усиление эвапотранспирации в период активной вегетации при снижении атмосферного питания в периоды, предшествующие датам расчета по модели, может приводит к удержанию воды, заключенной в болотном массиве. Полученный вывод о снижении болотной составляющей стока в период активной вегетации до нуля нуждается в дополнительной проверке, желательно с привлечением прямых детальными измерений элементов водного баланса.

Доля питания речных вод за счет атмосферных осадков – значительная и может составлять от 30 до 60% и более. Характерно, что в зимний период питание атмосферными водами не прекращалось и достаточно высоко (28%), что практически находится на уровне доли в весеннее половодье (33%). Это обусловлено, как изложено выше, специфической метеорологической ситуацией, сложившейся в бассейне в зимний период 2017/2018 года. Максимумы долей атмосферного питания отмечаются на даты съемки после схода весеннего половодья до наступления устойчивой летней межени и в 2017, и в 2018 годах. С учетом предшествующего увлажнения и регистрации осадков в эти

исследуемые периоды доля атмосферных вод представляется обоснованной. Однако во время съемок поверхностного склонового стекания не было отмечено. Очевидно, что в процессе инфильтрации талых снеговых и дождевых вод происходит их аккумуляция в первом от поверхности безнапорном водоносном горизонте – верховодке. По химическому свойству эта водная масса близка к составу атмосферных осадков. Подтверждением этому являются пробы, отобранные из колодца в деревне Мухино, которые по составу попадают в кластер речных проб, отобранных на половодье, и тяготеют к пробам атмосферных осадков.

Достоверность полученных оценок источников по модели смешения подтверждается результатами ее валидации, выполняемой путем сравнения выборок измеренных и модельных серий по коэффициенту корреляции (r). Наилучшая связь характерна для HCO_3^- и SPC – $r > 0,91$, для Ca^{2+} , Mg^{2+} , Si и XPK – $r > 0,75$. Более слабая связь проявляется для SO_4^{2-} ($r = 0,62$), но устранение из анализа двух выбросов (описанных выше) приводит к увеличению тесноты связи до $r = 0,85$.

К недостатку применяемого подхода следует отнести экспертную интерпретацию источников питания. Применение изотопных трассеров воды в модели смешения и методов оценок времени контакта (mean resident time) воды на водосборе в перспективе могло бы разрешить эту проблему. Главной трудностью реализации такого подхода в России является необходимость организации специального высокочастотного мониторинга на водосборах и высоких затратах на лабораторные анализы.

Выводы

Результаты выполненных гидролого-гидрохимических съемок в 2017 и 2018 годах в пределах водосбора реки Велеса бассейна реки Западная Двина позволили адаптировать модель смешения ЕММА и сформулировать следующие выводы:

Уточнены виды источников питания характерных для водосбора реки Велеса. Ими

являются: воды валдайского надморенного водного- и озерно-ледникового водоносного горизонта, болотные воды, воды атмосферных осадков.

Оценены доли источников питания и выявлен специфический характер их сезонной динамики в исследуемый период. Доля вод надморенного водного- и озерно-ледникового комплекса – довольно значительная, это постоянно действующая составляющая речного стока, ее величина в период половодья 2018 года составляет около 20%, а в периоды, следующие за сходом половодья, их доля возрастает и достигает – 31% и 38% в 2017 и 2018 годах соответственно.

Болотная составляющая речного стока также довольно значительна, но присутствует в определенные периоды водного цикла. В теплые периоды 2017 и 2018 годов, следующие за весенним половодьем, доля стока при активной вегетации и высоком испарении, согласно расчетам модели, падает до нуля. В половодный период болотная составляющая достигает максимума – 46%, в зимний она составляет около 35% от общего речного стока.

Специфическая гидрометеорологическая ситуация в 2017 году, отразившаяся в аномально высоких суммах осадков на 40–50% выше нормы, в том числе и в первую половину осенне-зимнего периода, а также в зимних оттепелях, определила высокую долю атмосферных вод (30%) в речных водах в зимний межледниковый период.

Доля атмосферных вод в теплый период года максимальна и достигает порядка 60%. Источник, представленный в модели как «атмосферные воды», поступает путем подповерхностного стекания из зоны аэрации – верховодки.

Существенной новизной работы можно считать появившуюся возможность оценки болотной составляющей стока на основе ЕММА-модели, что демонстрирует перспективность этой методики для углубленного исследования закономерностей формирования водного режима заболоченных бассейнов рек и оценки динамики их компонент на климатические изменения.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института водных проблем Российской академии наук (тема №122041100222-7), а также при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект №17-77-30006_и).

Литература

Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Под ред. П.А. Лозовика, Н.А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.

Батуев В.И., Калюжный И.Л. Анализ факторов, определяющих многолетнее изменение стока с олиготрофных болот // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 6. С. 28–46. DOI: [10.35567/1999-4508-2020-6-2](https://doi.org/10.35567/1999-4508-2020-6-2).

Вомперский С.Э., Сиринов А.А., Глухов А.И. Формирование и режим стока при гидромелиорации. М.: Наука, 1988. 168 с.

Воронков П.П. Гидрохимия местного стока европейской территории СССР (Основы гидрохимического принципа картирования). Л.: Гидрометиздат, 1970. 188 с.

Губарева Т.С., Болдескул А.Г., Гарцман Б.И., Шамов В.В. Анализ природных трассеров и генетических составляющих стока в моделях смешения (на примере малых бассейнов в Приморье) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 4. С. 387–399. DOI: [10.7868/S0321059616040064](https://doi.org/10.7868/S0321059616040064).

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.

Калюжный И.Л., Лавров С.А., Романюк К.Д. Изменения водного режима болот севера и северо-запада России под влиянием климатических факторов // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 1. С. 13–25.

Лавров С.А., Калюжный И.Л. Физические процессы и закономерности формирования зимнего и весеннего стока рек бассейна Волги в

Acknowledgments

This study was carried out within the framework of the State Assignment of the Water Problems Institute Russian Academy of Sciences (subject no. 122041100222-7) and with the financial support of the Russian Science Foundation grant (project no. 17-77-30006_i).

References

Analiticheskie, kineticheskie i raschetnye metody v gidrokhimicheskoi praktike [Analytical, kinetic and computational methods in hydrochemical practice]. P.A. Lozovik, N.A. Efremenko (eds.). St. Petersburg: Publ. Nestor-Istoriya, 2017. 272 p. (In Russian).

Batuyev V.I., Kalyuzhnyi I.L. Analiz faktorov, opredelyayushchikh mnogoletnee izmenenie stoka s oligotrofnykh bolot [Analysis of the factors determining many-year changes of runoff from oligotrophic bogs]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie [Water sector of Russia: problems, technologies, management]*, 2020, no. 6, pp. 28–46. (In Russian; abstract in English). DOI: [10.35567/1999-4508-2020-6-2](https://doi.org/10.35567/1999-4508-2020-6-2).

Bustillo V., Victoria R.L., Moura J.M.S., Victoria D.C., Toledo A.M.A., Collicchio E. Biogeochemistry of the Amazonian Floodplains: Insights from Six End-Member Mixing Models. *Earth interaction*, 2010, vol. 14, iss. 9, pp. 1–83. DOI: [10.1175/2010EI326.1](https://doi.org/10.1175/2010EI326.1).

Chen H., Chen Y., Li W., Li Zh. Quantifying the contributions of snow/glacier meltwater to river runoff in the Tianshan Mountains, Central Asia. *Global and Planetary Change*, 2019, vol. 174, pp. 47–57. DOI: [10.1016/j.gloplacha.2019.01.002](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.01.002).

Christophersen N., Hopper R.P. Multivariate analysis of stream water chemical data: the use of principal component analysis for the end-member mixing problem. *Water Resources Research*, 1992, vol. 28, iss. 1, pp. 99–107. DOI: [10.1029/91WR02518](https://doi.org/10.1029/91WR02518).

Christophersen N., Neal C., Hooper R.P., Voght R.D., Andersen S. Modelling stream water chemistry of soilwater endmembers – a step towards second-generation acidification models. *Journal of*

условиях изменения климата // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2012. № 4. С. 74–84.

Лебедева Н.А. Естественные ресурсы подземных вод Московского артезианского бассейна. М.: Наука, 1972. 148 с.

Остапеня А.П. Полнота окисления органического вещества водных беспозвоночных методом бихроматного окисления // Доклады АН БССР. 1965. Т. 9. № 4. С. 273–276.

Павлова К.К., Субоч В.В. Оценка подземного стока в реки на заболоченных территориях // Труды ГГИ. Исследование подземного стока в реки. 1968. Вып. 122. С. 120–130.

Попов О.В. Подземное питание рек. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 291 с.

Соколов Б.Л., Саркисян В.О. Подземное питание горных рек (Методы количественной оценки). Л.: Гидрометеиздат, 1981. 240 с.

Харанжевская Ю.А., Синюткина А.А. Исследование роли болот в формировании стока рек бассейна Средней Оби // География и природные ресурсы. 2017. № 3. С. 97–109. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2017-3\(97-109\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-3(97-109)).

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. Т. 5. № 1. С. 92–109.

Bustillo V., Victoria R.L., Moura J.M.S., Victoria D.C., Toledo A.M.A., Collicchio E. Biogeochemistry of the Amazonian Floodplains: Insights from Six End-Member Mixing Models // Earth interaction. 2010. Т. 14. № 9. С. 1–83. DOI: [10.1175/2010EI326.1](https://doi.org/10.1175/2010EI326.1).

Chen H., Chen Y., Li W., Li Zh. Quantifying the contributions of snow/glacier meltwater to river runoff in the Tianshan Mountains, Central Asia // Global and Planetary Change. 2019. Т. 174. С. 47–57. DOI: [10.1016/j.gloplacha.2019.01.002](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.01.002).

Christophersen N., Hopper R.P. Multivariate analysis of stream water chemical data: the use of

Hydrology, 1990, vol. 116, iss. 1, pp. 307–320. DOI: [10.1016/0022-1694\(90\)90130-P](https://doi.org/10.1016/0022-1694(90)90130-P).

Gubareva T.S., Boldeskul A.G., Gartsman B.I., Shamov V.V. Analysis of natural tracers and genetic runoff components in mixing models: case study of small basins in Primor'e. *Water Resources*, 2016, vol. 43, iss. 4, pp. 629–639. DOI: [10.1134/S0097807816040060](https://doi.org/10.1134/S0097807816040060). (Russ. ed.: Gubareva T.S., Boldeskul A.G., Gartsman B.I., Shamov V.V. Analiz prirodnykh trasserov i geneticheskikh sostavlyayushchikh stoka v modelyakh smesheniya (na primere malykh basseinov v Primor'e). *Vodnye resursy*, 2016, vol. 43, iss. 4, pp. 387–399. DOI: [10.7868/S0321059616040064](https://doi.org/10.7868/S0321059616040064)).

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, no. 3, pp. 97–108).

Hoeg S. On the Balance Equations and Error Estimators for Separating n Time Components of Runoff with One Stable Isotope Tracer. *Water Resources Research*, 2019, vol. 55, iss. 10, pp. 8252–8269. DOI: [10.1029/2019WR025555](https://doi.org/10.1029/2019WR025555).

Hooper R.P. Diagnostic tools for mixing models of stream water chemistry. *Water Resources Research*, 2003, vol. 39, iss. 3, pp. 2-1–2-13. DOI: [10.1029/2002WR001528](https://doi.org/10.1029/2002WR001528).

Kalyuzhnyi I.L., Lavrov S.A., Romanyuk K.D. Variations in water regime of bogs in northern and northwestern russia under the effect of climatic factors. *Water Resources*, 2012, vol. 39, iss. 1, pp. 44–55. DOI: [10.1134/S0097807812010046](https://doi.org/10.1134/S0097807812010046). (Russ. ed.: Kalyuzhnyi I.L., Lavrov S.A., Romanyuk K.D. Izmeneniya vodnogo rezhima bolot severa i severo-zapada Rossii pod vliyaniem klimaticheskikh faktorov. *Vodnye resursy*, 2012, vol. 39, iss. 1, pp. 13–25).

Kharanzhevskaya Y.A., Sinyutkina A.A. Investigating the role of bogs in the streamflow

- principal component analysis for the end-member mixing problem // *Water Resources Research*. 1992. Т. 28. № 1. С. 99–107. DOI: [10.1029/91WR02518](https://doi.org/10.1029/91WR02518).
- Christophersen N., Neal C., Hooper R.P., Voght R.D., Andersen S.* Modelling stream water chemistry of soilwater endmembers – a step towards second-generation acidification models // *Journal of Hydrology*. 1990. Т. 116. № 1. С. 307–320. DOI: [10.1016/0022-1694\(90\)90130-P](https://doi.org/10.1016/0022-1694(90)90130-P).
- Hoeg S.* On the Balance Equations and Error Estimators for Separating n Time Components of Runoff with One Stable Isotope Tracer // *Water Resources Research*. 2019. Т. 55. № 10. С. 8252–8269. DOI: [10.1029/2019WR025555](https://doi.org/10.1029/2019WR025555).
- Hooper R.P.* Diagnostic tools for mixing models of stream water chemistry // *Water Resources Research*. 2003. Т. 39. № 3. С. 2-1–2-13. DOI: [10.1029/2002WR001528](https://doi.org/10.1029/2002WR001528).
- Klaus J., McDonnell J.J.* Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation // *Journal of Hydrology*. 2013. Т. 505. С. 47–64. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2013.09.006](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.006).
- Lv Y., Gao L., Geris J., Verrot L., Peng X.* Assessment of water sources and their contributions to streamflow by endmember mixing analysis in a subtropical mixed agricultural catchment // *Agricultural Water Management*. 2018. Т. 203. С. 411–422. DOI: [10.1016/j.agwat.2018.03.013](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.013).
- Pelletier A., Andréassian V.* Hydrograph separation: an impartial parametrisation for an imperfect method // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2020. Т. 24. № 3. С. 1171–1187. DOI: [10.5194/hess-24-1171-2020](https://doi.org/10.5194/hess-24-1171-2020).
- Rahman K., Besacier-Monbertrand A.-L., Castella E., Lods-Crozet B., Ilg Ch., Beguin O.* Quantification of the daily dynamics of streamflow components in a small alpine watershed in Switzerland using end member mixing analysis // *Environmental Earth Sciences*. 2015. Т. 74. № 6. С. 4927–4937. DOI: [10.1007/s12665-015-4505-5](https://doi.org/10.1007/s12665-015-4505-5).
- formation within the middle Ob basin. *Geography and Natural Resources*, 2017, vol. 38, iss. 3, pp. 256–266. DOI: [10.1134/S1875372817030064](https://doi.org/10.1134/S1875372817030064). (Russ. ed.: Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A. Issledovanie roli bolot v formirovanii stoka rek basseina Srednei Obi. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2017, no. 3, pp. 97–109. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2017-3\(97-109\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-3(97-109))).
- Klaus J., McDonnell J.J.* Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation. *Journal of Hydrology*, 2013, vol. 505, pp. 47–64. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2013.09.006](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.006).
- Lavrov S.A., Kalyuzhnyi I.L.* Fizicheskie protsessy i zakonomernosti formirovaniya zimnego i vesennego stoka rek basseina Volgi v usloviyakh izmeneniya klimata [Physical processes and regularities concerning the Volga river basin rivers winter and spring runoff formation in the conditions of climate change]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie [Water sector of Russia: problems, technologies, management]*, 2012, no. 4, pp. 74–84. (In Russian; abstract in English).
- Lebedeva N.A.* Estestvennye resursy podzemnykh vod Moskovskogo artezianskogo basseina [Natural groundwater resources of the Moscow artesian basin]. Moscow, Publ. Nauka, 1972. 148 p. (In Russian).
- Lv Y., Gao L., Geris J., Verrot L., Peng X.* Assessment of water sources and their contributions to streamflow by endmember mixing analysis in a subtropical mixed agricultural catchment. *Agricultural Water Management*, 2018, vol. 203, pp. 411–422. DOI: [10.1016/j.agwat.2018.03.013](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.013).
- Ostapenya A.P.* Polnota okisleniya organicheskogo veshchestva vodnykh bespozvonochnykh metodom bikhromatnogo okisleniya [Completeness of oxidation of organic matter of aquatic invertebrates by the method of bichromate oxidation]. *Doklady AN BSSR [Reports of the Academy of Sciences of the BSSR]*, 1965, vol. 9, iss. 4, pp. 273–276. (In Russian).
- Pavlova K.K., Suboch V.V.* Otsenka podzemnogo stoka v reki na zabolochennykh territoriyakh [Assessment of underground runoff into rivers in wetlands]. *Trudy GGI. Issledovanie podzemnogo*

stoka v reki [Proceedings of the GGI. Investigation of underground runoff into rivers], 1968, iss. 122, pp. 120–130. (In Russian).

Pelletier A., Andréassian V. Hydrograph separation: an impartial parametrisation for an imperfect method. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, vol. 24, iss. 3, pp. 1171–1187. DOI: [10.5194/hess-24-1171-2020](https://doi.org/10.5194/hess-24-1171-2020).

Popov O.V. *Podzemnoe pitanie rek [Underground feeding of rivers]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1968. 291 p. (In Russian).

Rahman K., Besacier-Monbertrand A.-L., Castella E., Lods-Crozet B., Ilg Ch., Beguin O. Quantification of the daily dynamics of streamflow components in a small alpine watershed in Switzerland using end member mixing analysis. *Environmental Earth Sciences*, 2015, vol. 74, iss. 6, pp. 4927–4937. DOI: [10.1007/s12665-015-4505-5](https://doi.org/10.1007/s12665-015-4505-5).

Sokolov B.L., Sarkisyan V.O. *Podzemnoe pitanie gornyykh rek (Metody kolichestvennoi otsenki) [Underground feeding of mountain rivers (Methods of quantitative assessment)]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1981. 240 p. (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 [University proceedings. Volga region. Natural sciences]*, 2014, vol. 5, iss. 1, pp. 92–109. (In Russian; abstract in English).

Vomperskii S.E., Sirin A.A., Glukhov A.I. *Formirovanie i rezhim stoka pri gidromelioratsii [Formation and regime of runoff during hydromelioration]*. Moscow, Publ. Nauka, 1988. 168 p. (In Russian).

Voronkov P.P. *Gidrokimiya mestnogo stoka evropeiskoi territorii SSSR (Osnovy gidrokhimicheskogo printsipa kartirovaniya) [Hydrochemistry of the local flow of the European territory of the USSR (Fundamentals of the*

hydrochemical principle of mapping]. Leningrad,
Publ. Gidrometizdat, 1970. 188 p. (In Russian).