

Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 5. 87–96
Савичев О.Г., Решетько М.В., Моисеева Ю.А. Методика реконструкции зонального водного стока в Западной Сибири ...

УДК 551.8:556.5

МЕТОДИКА РЕКОНСТРУКЦИИ ЗОНАЛЬНОГО ВОДНОГО СТОКА В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В ГОЛОЦЕНЕ

Савичев Олег Геннадьевич¹,
OSavichev@mail.ru

Решетько Маргарита Викторовна¹,
MRechetko@tpu.ru

Моисеева Юлия Александровна¹,
julchiky@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования определяется необходимостью изучения палеогидрологических условий, играющих важную роль при формировании геохимических аномалий. Методика подобных исследований в настоящее время разработана недостаточно, что сказывается на обоснованности и эффективности поисков полезных ископаемых.

Цель исследования: разработка и обоснование методики палеогидрологических реконструкций с целью определения суммарного водного стока, обусловленного зональными климатическими условиями.

Методы исследования: географо-гидрологический и статистические методы, математическое моделирование гидрологических процессов.

Результаты и выводы. Разработана математическая модель формирования суммарного зонального водного стока. На её основе предложена и апробирована методика палеогидрологических реконструкций. С помощью модели выявлено несинхронное изменение зонального водного стока в северной и центральной частях Западной Сибири, обусловленное различными тенденциями изменений климатических и геоэкологических условий. Показано, что более резкие и разнонаправленные колебания водного стока в голоцене в большей степени характерны для северных районов, соответствующих в настоящее время подзоне северной тайги, зонам лесотундры и тундры. В подзоне южной и средней тайги изменения водного стока менее выражены и более тесно связаны с болотными процессами. Сделан вывод о том, что увеличение изменчивости водного стока в целом должно привести к определённому росту изменчивости содержания ряда растворённых веществ и, следовательно, вероятности формирования гидрогеохимических аномалий. В среднесрочной перспективе при продолжении потепления климата следует ожидать увеличение лесистости водосборов. При этом вероятен рост суммарного водного стока в районах с заболоченностью менее 40 %.

Ключевые слова:

Палеогидрологические реконструкции, зональный водный сток, имитационно-статистическая модель водного стока, водный баланс, атмосферное увлажнение.

Введение

Интенсивность водообмена регулирует время и условия взаимодействия в системе «вода – порода – органическое вещество – газ» [1, 2]. По этой причине понимание палеогидрологических условий играет важную роль в построении теории формирования геохимических аномалий и поисков гидрогенных месторождений полезных ископаемых, что определяет актуальность палеогидрологических реконструкций. Однако методика подобных исследований мало разработана и опирается в основном на методику воднобалансовых расчётов и инженерно-гидрометеорологических изысканий для строительства в современный период либо представляет собой второстепенное приложение к методике климатических реконструкций, которые, в свою очередь, базируются на целом ряде достаточно грубых предположений [3–5]. В настоящее время используются различные методы палеоклиматических реконструкций [6–12] для периода голоцена на территории всего земного шара. На исследуемой территории Западной Сибири ранее проводились палеоботанические реконструкции

[8], палинологические [9, 10], дендрохронологические [11], палеогляциологические [12] и др.

Объекты, материалы и методы исследования

С учётом этого авторами предпринята попытка сформировать алгоритм палеогидрологических реконструкций с целью определения суммарного водного стока, обусловленного зональными климатическими условиями (далее «зональный годовой сток»). Разработка алгоритма проводилась на основе математической модели формирования годового водного стока, в свою очередь построенной на уравнении среднегодового водного баланса для условно однородного периода. При этом, во-первых, использовалась концепция относительно резкого перехода гидрологической системы из одного состояния в другое. Во-вторых, для апробации модели и алгоритма использовались опубликованные среднегодовые данные, полученные на территории бывшего СССР (прежде всего, в Сибири) за условно однородные периоды (либо за период 1930–1969 гг., либо за период 1970–2000-е гг.). Граница однородных периодов для данной терри-

тории является приближённой и принята с учётом выводов, приведённых в работах [13–15].

В качестве основных объектов исследования рассмотрены водосборы рек Чузик и Турухан. Река Чузик является элементом системы «Чузик – Парабель – Обь – Карское море» и расположена в пределах южнотаёжной подзоны в Обь-Иртышском междуречье в левобережной части бассейна реки Оби. Участок верхнего течения этой реки находится в границах одного из самых больших в мире болот – Васюганского. Общая площадь водосбора – 7090 км², заболоченность – 35 %, лесистость – 64 % [16]. Река Турухан является левым притоком реки Енисей, также расположена в пределах Западно-Сибирской равнины, но уже на границе лесотундры и северной тайги. Площадь её водосбора – 10100 км², лесистость – 37 %, заболоченность – менее 1 % [17]. Выбор указанных водотоков определялся задачами изучения палеогидрологических реконструкций на равнинной территории Западной Сибири.

Структура модели годового водного стока

Все модели стока в том или ином виде получены из уравнений сохранения массы и энергии. В данном случае использовано уравнение годового водного баланса водосбора без перетоков из смежных территорий [18]:

$$Y_i = H_i - E_i \pm \Delta Z_i, \quad (1)$$

где Y_i – слой водного стока, мм/период; H_i – слой общего увлажнения, складывающегося из жидких атмосферных осадков X_{ji} , водоотдачи из снежного покрова h_{si} и ледовых образований h_{li} ($H_i = X_{ji} + h_{si} + h_{li}$, мм/период); E_i – суммарное испарение с поверхности водосбора, мм/период; ΔZ_i – изменение влагозапасов в водосборе, мм/период; нижний индекс i в рассматриваемой работе соответствует году (y) или месяцу (m).

Для расчёта испарения, при отсутствии данных непосредственных наблюдений на воднобалансовых площадках, в российской литературе чаще всего рекомендуются метод М.И. Будыко и метод гидроклиматических расчётов [19–21], а в зарубежной – метод Пенмана–Монтейта [22, 23]. Обоснованное использование указанных методов предполагает наличие данных измерений суммарной радиации, эффективного излучения подстилающей поверхности, потока тепла в почву, скорости ветра, температуры воздуха и влажности приземных слоёв атмосферного воздуха, температуры испаряющей поверхности, влажности почвогрунтов в верхнем метровом слое и ряд других характеристик. При решении палеогидрологических реконструкций таких данных объективно нет, а введение дополнительных допущений только увеличивает неопределённость расчётов. Для решения этого вопроса целесообразно вернуться к формуле Шрейбера [24], предложенной ещё в начале XX века. Её физический смысл становится очевидным, если предпо-

ложить, что суммарное испарение (E) в последовательности испытаний Бернулли [23, 25], с учётом и общего увлажнения (H), и максимально возможного в конкретных природных условиях испарения E_0 , приближённо описывается уравнением

$$P(E \leq E_0) \approx 1 - \exp\left(-\frac{E_0}{H}\right), \quad (2)$$

где $P(E \leq E_0)$ – вероятность того, что значение E меньше или равно E_0 . Если принять $P(E \leq E_0) \approx \frac{E}{H}$, то, с учётом (1), (2), можно записать:

$$Y = H \exp\left(-\frac{E_0}{H}\right). \quad (3)$$

Величина E_0 , с учётом уравнения теплового баланса, является функцией радиационного баланса и теплообмена между атмосферой и почвогрунтами, которые, в свою очередь, нелинейно связаны с положительными температурами воздуха (состояние поверхности наиболее активно меняется за счёт растительности, развитие которой в целом ограничено именно положительными температурами воздуха). С учётом этого для территории бывшего СССР, по данным [26, 27] о водном балансе 113 средних рек, для широт севернее 30° получена зависимость:

$$E_0 = k_{E,1}(\sum T_{>0})^2 - k_{E,2}(\sum T_{>0})^3,$$

где $\sum T_{>0}$ – сумма положительных среднемесячных температур атмосферного воздуха, °C; $k_{E,1}$ и $k_{E,2}$ – эмпирические коэффициенты ($k_{E,1} = 0,3080 \pm 0,0144$; $k_{E,2} = 0,0021 \pm 0,0001$; квадрат корреляционного отношения $R^2 = 0,42$). Соотношение расчётных (3) и измеренных значений годового водного стока приведено на рис. 1.

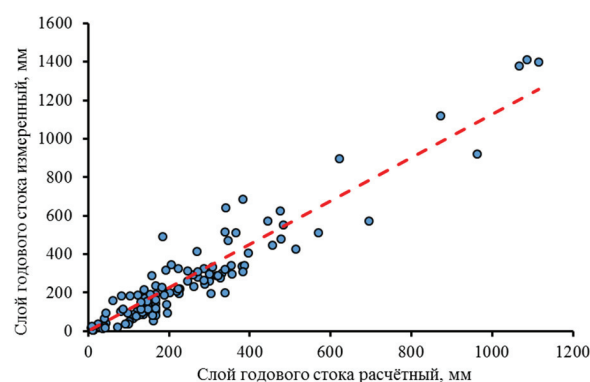


Рис. 1. Отношение измеренных и расчётных значений годового слоя водного стока средних рек на территории бывшего СССР, $R^2 = 0,89$

Fig. 1. Ratio of the measured and calculated values of annual runoff depth of medium size rivers in the territory of the former USSR, $R^2 = 0,89$

Транспирация и, следовательно, суммарное испарение и суммарный сток зависят от вида расти-

тельности [28–30]. Существенное влияние на суммарное испарение и сток, согласно [28, 31], оказывает и дренированность территории как фактор, совместно с испаряемостью определяющий выбор из двух вариантов: 1) стекает то, что не успело испариться; 2) испаряется то, что не успело стечь. Дренированность территории является, в свою очередь, функцией средней высоты водосбора. Регрессионный анализ материалов Водного кадастра СССР [26] позволил определить общий вид функции влияния на водный сток лесистости, заболоченности и средней высоты водосбора и более точно оценить связь водного стока, испаряемости и атмосферного увлажнения ($R^2=0,97$):

$$Y = k_{Y,1} H \eta^{k_{Y,2}} (f_F + 1)^{k_{Y,3}} (f_M + 1)^{k_{Y,4}} \exp\left(-\frac{E_0}{H}\right) = \mu H \exp\left(-\frac{E_0}{H}\right), \quad (4)$$

$$\eta = \begin{cases} Z_b - 500, & Z_b > 500 \\ 1, & Z_b \leq 500 \end{cases}$$

где Z_b – средняя высота водосбора, м (учитывается в горах, плоскогорьях и нагорьях с учётом градаций высотных отметок по [32]); f_M – заболоченность водосбора, %; f_F – лесистость водосбора, %; μ – функция влияния физико-географических условий на водный сток; $k_{Y,1}$, $k_{Y,2}$, $k_{Y,3}$, $k_{Y,4}$ – эмпирические коэффициенты (для изученных средних рек бывшего СССР методом наименьших квадратов получены следующие оценки значений коэффициентов: $k_{Y,1}=0,343$ (от 0,274 до 0,429); $k_{Y,2}=0,057 \pm 0,020$; $k_{Y,3}=0,278 \pm 0,052$; $k_{Y,4}=-0,108 \pm 0,034$).

Физический смысл зависимости (4), согласно [18, 23, 28, 29, 31, 33], заключается в том, что норма водного стока в целом возрастает: 1) с увеличением атмосферного увлажнения, средней высоты местности в горных районах (безусловно, в данном случае необходимо учитывать экспозицию склонов относительно преобладающего направления движения воздушных масс, но статистически значимая связь, тем не менее, присутствует: коэффициент корреляции между Z_b и отношением измеренных и расчётных значений годового слоя водного стока средних рек составляет $0,41 \pm 0,11$); 2) с увеличением лесистости водосбора, которая, несмотря на увеличение транспирации на участках размещения древесной растительности, определяет более высокий (по сравнению с безлесными участками) влагозапас в речном бассейне, участвующий во влагообороте в дренируемой зоне, и относительно равномерное поступление воды в речную сеть; 3) с уменьшением заболоченности водосбора, сопряжённой со слабой дренированностью территории и с «приоритетным» расходом влаги на насыщение торфяной залежи, пополнение внутриболотных водоёмов, испарение и только потом – на сток.

Используя разложение в ряд Тейлора [34], получим аппроксимации математического ожидания Y_a и стандартного отклонения σ_Y слоя стока:

$$Y_a \approx \mu H_a \exp\left(-\frac{E_0}{H_a}\right) \times \left(1 + \frac{\sigma_H^2}{\mu H_a} \frac{d\mu}{dH} \left(1 + \frac{E_0}{H_a}\right) + \frac{\sigma_H^2}{2\mu} \frac{d^2\mu}{dH^2} + \frac{Cv_H^2}{2} \frac{E_0^2}{H_a^2}\right), \quad (5)$$

$$\sigma_Y \approx \sigma_H \left[\left(\mu + \mu \frac{E_0}{H_a} + H_a \frac{d\mu}{dH} \right) \exp\left(-\frac{E_0}{H_a}\right) \right], \quad (6)$$

где H_a , σ_H , Cv_H – математическое ожидание, стандартное отклонение и коэффициент вариации слоя атмосферного увлажнения. Уравнения (5, 6) являются реализацией композиционного метода, связывающего статистические характеристики элементов водного баланса и физико-географических условий водосборов [5, 35, 36].

Функция μ косвенно связана с суммарным атмосферным увлажнением (как отражение зонального распределения растительности и почвенного покрова), но эта связь значимо проявляется в основном только для усреднённых интервалов. В частности, для водосборов средних рек на территории бывшего СССР была выявлена статистически значимая линейная связь между осреднёнными по дециметровым интервалам годовыми значениями атмосферного увлажнения и функцией μ (рис. 2; интервалы осреднения в мм: 300–399; 400–499, ...).

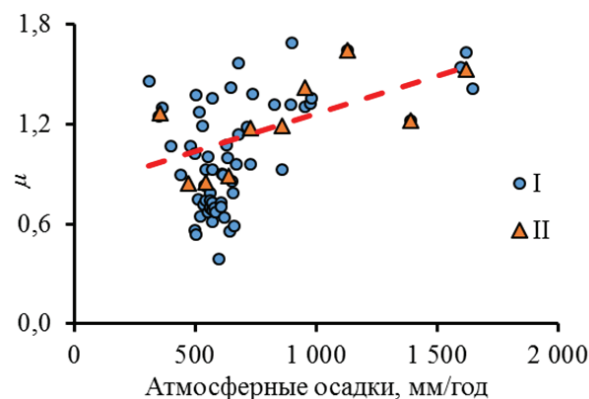


Рис. 2. Зависимость между суммой годовых атмосферных осадков и функцией μ для средних рек на территории бывшего СССР: I – среднееголетние значения для конкретных водосборов; II – усредненные значения для дециметровых интервалов атмосферного увлажнения. Уравнение регрессии построено по точкам (II): $\mu = (0,455 \pm 0,181)H_a + (0,807 \pm 0,172)$, $R^2=0,44$

Fig. 2. Relationship between the amount of precipitation and the function μ for medium size rivers in the territory of the former Soviet Union: I are the annual values for a particular watershed; II are the average values of decimeter ranges of atmospheric moisture. The regression equation is constructed by the points (II): $\mu = (0,455 \pm 0,181)H_a + (0,807 \pm 0,172)$, $R^2=0,44$

С учётом этого для проведения палеогидрологических реконструкций можно принять два варианта дальнейшего упрощения уравнений (5), (6):

$$1) \frac{d\mu}{dH} \approx 0; \quad 2) \frac{d\mu}{dH} \approx \psi, \text{ где } \psi - \text{ постоянная величина}$$

для природной зоны или их комплекса. В первом случае уравнения (5), (6) приводятся к компактной форме (7), (8), использование которой в настоящее время (с учётом недостаточной изученности связи $\mu = \mu(H_a)$), видимо, более предпочтительно:

$$Y_a \approx \mu H_a \exp\left(-\frac{E_0}{H_a}\right) \left(1 + \frac{C_{V_H} E_0^2}{2H_a^2}\right), \quad (7)$$

$$\sigma_Y \approx \sigma_H \mu \left(1 + \frac{E_0}{H_a}\right) \exp\left(-\frac{E_0}{H_a}\right). \quad (8)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Практическое использование уравнений (5), (6), (7) и (8) ограничено надёжностью данных о температуре атмосферного воздуха, об атмосферных осадках, лесистости и заболоченности территории. Климатические характеристики (средняя температура атмосферного воздуха T_a и средняя годовая сумма атмосферных осадков H_a) определены путём суммирования современных среднемноголетних значений для конкретных территорий на конец 1990-х – начало 2000-х гг., согласно [37], и отклонений от нормы на начало 2000-х гг., принятых по [38]. В случаях, когда имелись сведения об отклонениях температуры атмосферного воздуха, но отсутствовали сведения об изменении атмосферного увлажнения, использовалась региональная зависимость, полученная по данным 64 метеостанций [39, 40] на равнинной части Западной Сибири:

$$H_a = (-8,375 \pm 0,733)T_a^2 - (64,459 \pm 4,980)T_a + (430,444 \pm 5,964); \quad R^2 = 0,65,$$

где H_a и T_a – средние значения годовой суммы атмосферных осадков и среднегодовой температуры атмосферного воздуха. Сумма среднемесячных положительных температур воздуха $\Sigma T_{>0}$ вычислялась по региональной зависимости:

$$\Sigma T_{>0} = 68,197 \exp((0,059 \pm 0,003)T_a); \quad R^2 = 0,80.$$

Заболоченность на территории, соответствующей водосбору реки Чузик, определялась с учётом данных [41, 42] о периоде (9549 ± 60 лет) и интенсивности (в среднем 1,15 мм/год) формирования торфяной залежи толщиной 11 м на участке Васюганского болота (водораздел рек Чузик и Ича). В частности, толщина торфяной залежи и заболоченность 9550 лет назад приняты равными нулю. В прочие годы толщина торфяной залежи определена умножением периода её формирования на среднемноголетнюю интенсивность, а заболоченность – по линейной интерполяции между значениями заболоченности и толщины торфяной залежи по состоянию 9550 лет назад и в 1960-е гг. Ле-

систость данной территории определялась исходя из следующих допущений:

- около 10 тыс. лет назад, согласно [38, 43, 44], рассматриваемый район в целом характеризовался отсутствием значимой древесной растительности; при этом следует отметить, что основные палеолитические местонахождения сарганского возраста находятся несколько южнее [45], то есть там, где были относительно более благоприятные условия для жизни;
- в момент формирования очагов будущего Васюганского болота (9550 лет назад) в районе могли быть распространены тундро- и лесостепные ландшафты (для формирования торфов, включая древесные, необходимо наличие болотной растительности, которая не могла развиваться в отрыве от формирования растительного покрова на водосборе); размер лесистости в этот период принят по аналогии с современными лесостепными ландшафтами южной части Западной Сибири (10 %);
- примерно 4000 лет назад кочевые племена так называемой андроновской культуры мигрировали южнее рассматриваемой территории [46], что свидетельствует уже о значительной залеснённости и заболоченности района, принятых в размере 40 и 20 % соответственно; оценка лесистости в размере 40 % определяется результатами анализа морфометрических характеристик средних рек Северной Евразии (территории бывшего СССР), показавшего, что: 1) заболоченность водосбора до 5–10 % может соответствовать практически любой лесистости (речные долины могут быть заболочены и в степной зоне); 2) уменьшение лесистости вследствие переувлажнения территории происходит ориентировочно при заболоченности 40 % и выше; 3) при заболоченности 15–40 % лесистость водосборов средних равнинных рек Сибири в таёжной зоне в целом составляет 40–70 % (рис. 3); с учётом этого выбран нижний предел устойчивого перехода от лесостепи к таёжной зоне.

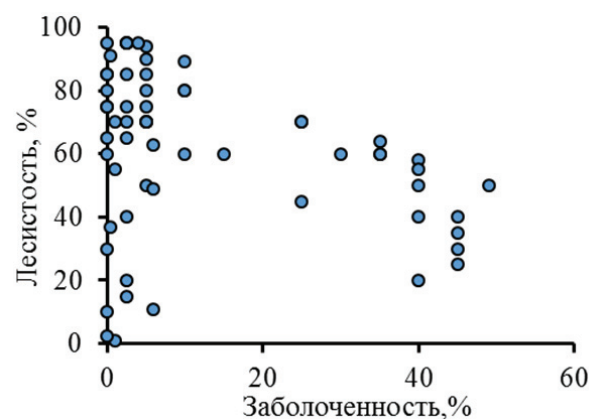


Рис. 3. Соотношение заболоченности и лесистости водосборов средних рек в Северной Евразии

Fig. 3. Relation between boggedness and forest cover watersheds of medium size rivers in Northern Eurasia

В случае территории, соответствующей современному водосбору реки Турухан, был использован несколько изменённый алгоритм: 1) из-за суровых климатических условий и наличия многолетней мерзлоты толщина торфяной залежи в целом незначительна, причём возраст торфяных болот в районе п. Игарка определён в размере 6030 лет [47]; 2) согласно [38], для севера Сибири были характерны температурные минимумы с восстановлением тундры примерно 9400 и 2900 лет назад, а температурный максимум с распространением лесных сообществ – около 6000 лет назад (принят возраст торфообразования 6030 лет); лесистость в периоды времени, соответствующие температурным минимумам, принята по аналогии с современными реками тундры (р. Щучья) в размере 1 %, а в периоды, соответствующие температурным максимумам, – пропорционально сумме положительных температур в 1960-е гг. и 6030 лет назад. Принятые оценки климатических и морфометрических характеристик приведены в таблице, а полученные на их основе значения слоя годового водного стока – на рис. 4, 5.

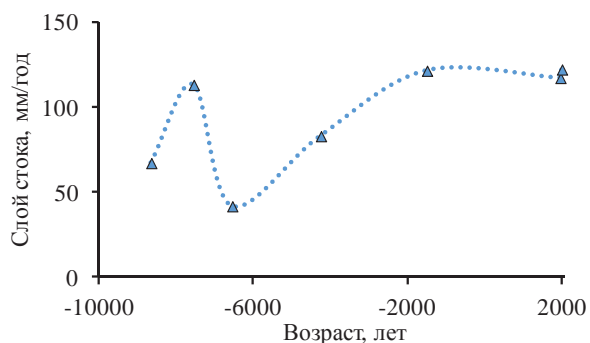


Рис. 4. Изменение слоя зонального годового водного стока на территории водосбора реки Чузик (в створе с. Осипово)

Fig. 4. Changing of the layer of zonal annual water runoff in the area of watershed of the river Chuzik (in cross section of Osipovo)

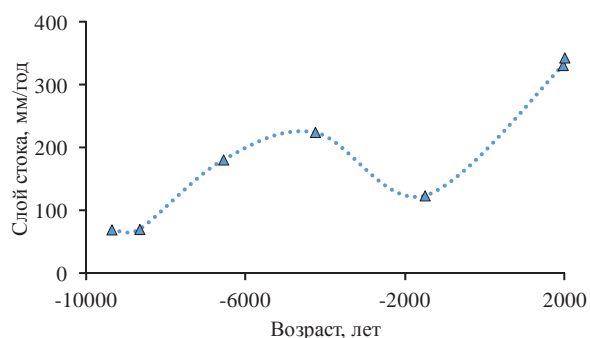


Рис. 5. Изменение слоя годового водного стока на территории водосбора реки Турухан (в створе п. Янов Стан)

Fig. 5. Changing of the layer of zonal annual water runoff in the area of watershed of the river Turukhan (in cross section of Yanov Stan)

Анализ результатов моделирования показал, что изменения в течение голоцена суммарного вод-

ного стока в северной и центральной части Сибири происходило несинхронно, даже несмотря на совпадение тенденций в изменении климата. Причиной этого является наличие нелинейных связей между водным стоком, атмосферным увлажнением, лесистостью и заболоченностью водосборов (рис. 2, 3). Совместное влияние лесистости и заболоченности, с одной стороны, сказывается на флуктуации водных циклов, обусловленных структурой водного баланса, а именно нелинейной связью стока и влагозапасов [35]. С другой стороны, особенности функционирования лесных сообществ (время жизни и половой зрелости, потребность в воде, термический режим атмосферы и почвогрунтов, требования к плодородию и водному режиму почв, закономерности сукцессии) определяют наличие дополнительных автоколебаний водного стока [30, 48].

Таблица. Климатические и морфометрические характеристики, принятые для расчёта годового зонального стока

Table. Climatic and morphometric characteristics taken for calculating the annual zonal runoff

Территория, соответствующая в настоящее время водосбору реки (в створе) The area currently corresponding to the river watershed (in cross section)	Расчётный год Hydrological year	T_a , °C	H_a , мм/год mm/year	f_f , %	f_m , %
р. Чузик (с. Осипово) River Chuzik (Osipovo)	-8650	-4,7	548	0	0
	-7550	-3,0	548	10	0
	-6550	2,3	455	16	4
	-4250	0,1	538	30	12
	-1500	-3,0	548	47	22
	1960	-1,5	564	64	35
	2000	-1,2	578	68	35
р. Турухан (п. Янов Стан) River Turukhan (Yanov Stan)	-9350	-7,4	449	0	
	-8650	-11,2	382	0	
	-6550	-4,2	607	11	1
	-4250	-6,5	520	38	
	-1500	-5,5	486	9	
	1960	-8,3	610	37	
	2000	-7,7	634	38	

Примечание: T_a – средняя температура атмосферного воздуха; H_a – средняя сумма атмосферных осадков за год; f_f и f_m – лесистость и заболоченность водосборной территории.

Note: T_a is the the average temperature of atmospheric air; H_a is the average sum of atmospheric precipitation for a year; f_f and f_m are the forestness and marshiness of river basin.

В целом возрастание лесистости водосборов при их незначительной заболоченности приводит к общему увеличению зонального стока. С увеличением заболоченности и/или деградацией лесных сообществ при похолодании величина стока снижается. Можно предположить, что снижение стока за счёт роста заболоченности также ограничено условиями функционирования болотных экосистем, поскольку развитие болота ограничено не только водными и тепловыми ресурсами, но и возможностью удержания воды в торфяной за-

лежи. Поэтому в какой-то момент прирост торфяной залежи прерывается и начинается формирование вторичной (внутриболотной) гидрографической сети, совсем не обязательно связанное с потеплением климата [49].

Выводы

Выявлено несинхронное изменение водного стока в северной и центральной части Западной Сибири, обусловленное различными тенденциями изменений климатических и геоэкологических условий. Более резкие и разнонаправленные колебания водного стока в голоцене в большей степени характерны для северных районов, соответствующих в настоящее время подзоне северной тайги, зонам лесотундры и тундры. В подзоне южной и средней тайги изменения водного стока менее выражены и более тесно связаны с болотными процессами.

В работах [50, 51] показано, что зависимость между модульными коэффициентами расходов воды и концентрациями вещества в водной среде по виду близка к функции гамма-распределения, причём основная часть наблюдений обычно соот-

ветствует кривой спада, имеющей вид обратной степенной зависимости. С учётом этого можно сделать вывод о том, что увеличение изменчивости водного стока в целом должно привести к определённому росту изменчивости содержаний ряда растворённых веществ и, следовательно, вероятности формирования гидрогеохимических аномалий.

В среднесрочной перспективе при продолжении потепления климата, влияние которого на водный цикл может быть чрезвычайно сложным и разнообразным [52], следует ожидать увеличение лесистости водосборов. При этом вероятен рост суммарного водного стока в районах с заболоченностью менее 40 %. На заболоченных территориях возможны смена растительных сообществ и перестройка внутриболотной гидрографической сети, в течение которых вероятны различные сценарии – от незначительного увеличения стока до его уменьшения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (проект № 14.Z50.31.0012), Томского политехнического университета (проект ВИУ_VAF_144_2014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grenthe I., Puigdomenech I. Symbols, standards and conventions // Modelling in aquatic chemistry. – Paris: Nuclear energy agency, 1997. – P. 35–68.
2. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода. Т. 1. Система вода–порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование / отв. ред. С.Л. Шварцев. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 244 с.
3. Изменчивость климата Европы в историческом прошлом / М.М. Чернавская, А.Н. Золотокрылин, А.Н. Кренке, М.Е. Ляхов, Р. Браздил и др. – М.: Наука, 1995. – 218 с.
4. Дианский Н.А. Моделирование циркуляции в океане и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. – М.: Физматлит, 2012. – 272 с.
5. Кислов А.В. Климат в прошлом, настоящем и будущем. – М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. – 347 с.
6. A mid-Holocene climate reconstruction for eastern South America / L.F. Prado, I. Wainer, C.M. Chiessi, M.-P. Ledru, B. Turcq // Climate of the Past. – 2013. – V. 9. – P. 2117–2133.
7. Bostonalieva Zh.K. Late Quaternary Climate Change in Western Eurasia. A spatio-temporal review of climate proxies. PhD thesis. – Berlin, 2015. – 140 p.
8. Antipina T.G., Panova N.K., Korona O.M. The Holocene Dynamics of Vegetation and Environmental Conditions on the Eastern Slope of the Northern Urals // Russian Journal of Ecology. – 2014. – V. 45. – № 5. – P. 351–358.
9. Premke-Kraus M. Holocene environmental history of the Kara Sea (Siberian Arctic, Russia) inferred from marine palynological records. – Bremerhaven: Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research (AWI), 2008. – 160 p.
10. Gajewski K. Holocene paleoclimate data from the Arctic: testing models of global climate change // Global and Planetary Change. – 2015. – V. 128. – P. 14–23.
11. Dendroclimatic reconstruction of autumn–winter mean minimum temperature in the eastern Tibetan Plateau since 1600 AD / Rui-bo Zhang, Yu-jiang Yuan, Wen-shou Wei, Xiao-hua Gou, Shu-long Yu, Hua-ming Shang, Feng Chen, Tong-wen Zhang, Li Qin // Dendrochronologia. – 2015. – V. 33. – P. 1–7.
12. The Taimyr Peninsula and the Severnaya Zemlya archipelago, Arctic Russia: a synthesis of glacial history and palaeo-environmental change during the Last Glacial cycle (MIS 5ee2) // P. Moller, H. Alexanderson, S. Funder, C. Hjort // Quaternary Science Reviews. – 2015. – V. 107. – P. 149–181.
13. Кислов А.В. Изменения и изменчивость глобального климата // Современные глобальные изменения природной среды. В 2-х т. Т. 1 / отв. ред. Н.С. Касимов и Р.К. Клиге. – М.: Научный мир, 2006. – С. 118–129.
14. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections / A.I. Shiklomanov, R.B. Lammers, D.P. Lettenmaier et al. // Environmental Changes in Siberia: Regional Changes and their Global Consequences / Eds. P. Ya. Groisman, G. Gutman. – Dordrecht: Springer, 2013. – Ch. 4. – P. 111–154.
15. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change / Eds. R.K. Pachauri, L. Meyer // IPCC. – Geneva, Switzerland, 2015. – 151 p.
16. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 16. Ангаро-Енисейский район. Вып. 1. Енисей / под ред. А.П. Муранова. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 373 с.
17. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 2. Средняя Обь / под ред. Н.А. Паниной. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 408 с.
18. Loucks D.P., Van Beek E. Water resources systems planning and management. An Introduction to Methods, Models and Applications. – Turin: UNESCO Publ., printed by Ages Arti Grafiche, 2005. – 679 p.
19. Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности. – Л.: Гидрометеиздат, 1956. – 256 с.
20. Мезенцев В.С. Гидрологические расчёты в мелиоративных целях. – Омск: Изд-во Омского СХИ, 1982. – 84 с.
21. Методические рекомендации по учету влияния хозяйственной деятельности на сток малых рек при гидрологических расче-

- тах для водохозяйственного проектирования / под ред. Е.Э. Булаховской. – Л.: Госкомгидромет, 1986. – 168 с.
22. Hendriks M.R. Introduction to Physical Hydrology. – Oxford; New York: Oxford University Press, 2010. – 331 p.
23. Руководство по гидрологической практике. Т. II. Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов. – Geneva, Switzerland, 2012. – 324 с.
24. Schreiber P. Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa (German) // *Meteorol. Zs.* – 1904. – V. 21. – S. 441–452.
25. Feller W. An introduction to probability theory and its applications. V. 2. Second ed. New York; London; Toronto: John Wiley&Sons, Inc., 1971. – 738 p.
26. Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза. – Л.: Гидрометеоздат, 1967. – 199 с.
27. СНиП II-A.6–72. Строительные нормы и правила. Часть II. Раздел А. Глава 6. Строительная климатология и геофизика. – М.: Госстрой СССР, 1973. – 320 с.
28. Кузин П.С., Бабкин В.И. Географические закономерности гидрологического режима рек. – Л.: Гидрометеоздат, 1979. – 200 с.
29. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и массообмена поверхности суши с атмосферой. – М.: Наука, 2010. – 327 с.
30. Bradshaw R.H.M., Sykes M.T. Ecosystem Dynamics. From the past to the future. – Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2014. – 321 p.
31. Mujumdar P.P., Nagesh Kumar D. Floods in a Changing Climate. Hydrologic Modelling. – New York: Cambridge University Press, 2012. – 177 p.
32. Рычагов Г.И. Общая геоморфология. – М.: МГУ, 2006. – 416 с.
33. Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Borisova O.K. River runoff decrease in North-Eurasian plains during the Holocene optimum // *Water Resources.* – 2012. – V. 39. – № 1. – P. 69–81.
34. Handbook of applicable mathematics / ed. by E. Lloyd, W. Lederman. Vol. VI. P. A. – Chichester; New York; Brisbane; Toronto; Singapore: John Wiley&Sons, Inc., 1984. – 510 p.
35. Найдёнов В.И. Нелинейная динамика поверхностных вод суши. – М.: Наука, 2004. – 318 с.
36. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. – М.: Наука, 2007. – 279 с.
37. СНиП 23–01–99*. Строительная климатология. – М.: Госстрой, ГУП ЦПП, 2003. – 162 с.
38. Climate changes in Siberia / P.Ya. Groisman, T.A. Blyakharchuk, A.V. Chernokulsky et al. // *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences* / Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. – Dordrecht: Springer, 2013. – Ch. 3. – P. 57–110.
39. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Части 1–6. Вып. 20. Томская, Новосибирская, Кемеровская области, Алтайский край. – СПб.: Гидрометеоздат, 1993. – 718 с.
40. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Части 1–6. Вып. 17. Тюменская и Омская области. – СПб.: Гидрометеоздат, 1998. – 702 с.
41. Лапшина Е.Д., Мульдьяров Е.Я. Основные этапы развития Большого Васюганского болота // *Большое Васюганское болото* / под ред. М.В. Кабанова. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2002. – С. 36–44.
42. Пологова Н.Н., Лапшина Е.Д. Накопление углерода в торфяных залежах Большого Васюганского болота // *Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития* / под ред. М.В. Кабанова. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2002. – С. 174–179.
43. Малолетко А.М. Эволюция речных систем Западной Сибири в мезозое и кайнозое. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2008. – 288 с.
44. Ахтерьякова А.В., Лещинский С.В. Результаты комплексного исследования двух голоценовых торфяников Тобольско-Прииртышского литофациального района // *Известия Томского государственного университета.* – 2014. – Т. 385. – С. 171–180.
45. Позднепалеолитическое местонахождение Шестаково / А.П. Деревянко, В.И. Молодин, В.Н. Зенин, С.В. Лещинский, Е.Н. Мащенко. – Новосибирск: Изд-во Института археологии и этнографии СО РАН, 2003. – 168 с.
46. Молодин В.И., Новиков А.В., Марченко Ж.В. Древняя и средневековая история южного Васюганья // *Большое Васюганское болото* / под ред. М.В. Кабанова. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2002. – С. 5–29.
47. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / О.Л. Лисс, Л.И. Абрамова, Н.А. Аветов, Н.А. Березина, Л.И. Инишева и др. – Тула: Гриф и К°, 2001. – 584 с.
48. Кузнецов В.И., Козлов Н.И., Хомяков П.М. Математическое моделирование эволюции леса для целей управления водным хозяйством. – М.: ЛЕНАНД, 2005. – 232 с.
49. Савичев О.Г., Паромов С.В. Гидрологические аспекты образования болот в таёжной зоне Западной Сибири // *Известия Томского политехнического университета.* – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 154–161.
50. Савичев О.Г., Нгуен В.Л. О методике определения фоновых и аномальных значений гидрохимических показателей // *Известия Томского политехнического университета.* – 2015. – Т. 326. – № 9. – С. 133–142.
51. Spatial Patterns of the Evolution of the Chemical Composition and Discharge of River Water in the Ob River Basin / O.G. Savichev, A.K. Mazurov, I.I. Pipko, V.I. Sergienko, I.P. Semiletov // *Doklady Earth Sciences.* – 2016. – V. 466. – Part 1. – P. 47–51.
52. Georgiadi A.G. The change of the hydrological cycle under the influence of global warming // *Hydrology for the Water Management of Large River Bas.* – 1991. – № 201. – P. 119–128.

Поступила 15.04.2016 г.

Информация об авторах

Савичев О.Г., доктор географических наук, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Решетько М.В., кандидат географических наук, доцент кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Моисеева Ю.А., аспирант кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 551.8: 556.5

METHODS OF RECONSTRUCTION OF A ZONAL RUNOFF IN WESTERN SIBERIA IN HOLOCENE

Oleg G. Savichev¹,
OSavichev@mail.ru

Margarita V. Reshetko¹,
MRechetko@tpu.ru

Yulia A. Moiseeva¹,
julchiky@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is determined by the necessity to study paleohydrological conditions, which play an important role in formation of geochemical anomalies. The methodology of such studies is currently not sufficiently developed, that affects the reasonableness and effectiveness of searches of minerals.

The aim of the research is to develop and substantiate the methods of paleohydrological reconstructions for determining the total runoff caused by the zonal climate.

Methods: geographical and hydrological and statistical methods, mathematical modeling of hydrological processes.

Results and conclusions. The authors have developed the mathematical model of formation of total zonal runoff. On its basis the methodology of paleohydrological reconstructions was proposed and tested. By means of the model the authors determined the non-synchronous change in the zonal water runoff in northern and central parts of Western Siberia, caused by different trends of climatic changes and geo-ecological conditions. It was shown that more abrupt and differently directed water runoff fluctuations during the Holocene are more typical for northern regions, currently corresponding to the northern taiga subzone, forest tundra and tundra zones. The changes of water runoff are less pronounced and more closely associated with wetland processes in the subzone of the southern and middle taiga. The authors made the conclusions that the increase in the water runoff variability as a whole would lead to a certain growth in the variability of the contents of a number of dissolved substances and consequently the probability of formation of hydrogeochemical anomalies. In the medium term the increase in forested catchments should be expected with continued warming. At the same time the increase in total water runoff is probable in areas with less than 40 % swamping.

Key words:

Paleohydrological reconstruction, zonal water flow, simulation and stochastic model of water flow, water balance, atmospheric moistening.

The research was financially supported by the Government of the Russian Federation (project no. 14.Z50.31.0012), Tomsk Polytechnic University (project БИУ_VAF_144_2014).

REFERENCES

1. Grenthe I., Puigdomenech I. Symbols, standards and conventions. *Modelling in aquatic chemistry*. Paris, Nuclear energy agency, 1997. pp. 35–68.
2. *Geologicheskaya ehvolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda–poroda. T. 1. Sistema voda–poroda v zemnoy kore: vzaimodeystvie, kinetika, ravnovesie, modelirovanie* [Geological evolution and self-organizing of water–rock system. V. 1. Water–rock system in an earth's crust: interaction, kinetic, balance, modelling]. Ed. by S.L. Shvartsev. Novosibirsk, Publishing house of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 2005. 244 p.
3. Chernyavskaya M.M., Zolotokrylin A.N., Krenke A.N., Lyakhov M.E., Brazdil R. *Izmenchivost klimata Evropy v istoricheskoy proshlom* [Changeability of Europe climate in the historical past]. Moscow, Nauka Publ., 1995. 218 p.
4. Diansky N.A. *Modelirovanie tsirkulyatsii v okeane i issledovanie ego reaksii na korotkoperiodnyye i dolgoperiodnyye atmosferye vozdeystviya* [Modelling of circulation in the ocean and study of its response to short-period and long-period weather resistance]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2012. 272 p.
5. Kislov A.V. *Klimat v proshlom, nastoyashchem i budushchem* [Climate in the past, present and future]. Moscow, MAIK Nauka-Interperiodika Publ., 2001. 347 p.
6. Prado L.F., Wainer I., Chiessi C.M., Ledru M.-P., Turcq B. A mid-Holocene climate reconstruction for eastern South America. *Climate of the Past*, 2013, vol. 9, pp. 2117–2133.
7. Bostonalieva Zh.K. *Late Quaternary Climate Change in Western Eurasia A spatio-temporal review of climate proxies*. PhD thesis. Berlin, 2015. 140 p.
8. Antipina T.G., Panova N.K., Korona O.M. The Holocene Dynamics of Vegetation and Environmental Conditions on the Eastern Slope of the Northern Urals. *Russian Journal of Ecology*, 2014, vol. 45, no. 5, pp. 351–358.
9. Premke-Kraus M. *Holocene environmental history of the Kara Sea (Siberian Arctic, Russia) inferred from marine palynological records*. Bremerhaven, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research (AWI), 2008. 160 p.
10. Gajewski K. Holocene paleoclimate data from the Arctic: testing models of global climate change. *Global and Planetary Change*, 2015, vol. 128, pp. 14–23.
11. Rui-bo Zhang, Yu-jiang Yuan, Wen-shou Wei, Xiao-hua Gou, Shu-long Yu, Hua-ming Shang, Feng Chen, Tong-wen Zhang, Li Qin. Dendroclimatic reconstruction of autumn–winter mean minimum temperature in the eastern Tibetan Plateau since 1600 AD. *Dendrochronologia*, 2015, vol. 33, pp. 1–7.
12. Moller P., Alexanderson H., Funder S., Hjort C. The Taimyr Peninsula and the Severnaya Zemlya archipelago, Arctic Russia: a

- synthesis of glacial history and palaeo-environmental change during the Last Glacial cycle (MIS 5e2). *Quaternary Science Reviews*, 2015, vol. 107, pp. 149–181.
13. Kislov A.V. *Izmeneniya i izmenchivost globalnogo klimata* [Changes and variability of global climate]. *Sovremennye globalnye izmeneniya prirodnoy sredy* [Today's global environmental changes]. Eds. N.S. Kasimov, R.K. Klige. Moscow, Nauchny mir Publ., 2006. Vol. 1, pp. 118–129.
 14. Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettenmaier D.P. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections. *Environmental Changes in Siberia: Regional Changes and their Global Consequences*. Ch. 4. Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. Dordrecht, Springer, 2013. pp. 111–154.
 15. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. Eds. R.K. Pachauri, L. Meyer. IPCC. Geneva, Switzerland, 2015. 151 p.
 16. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. T. 16. Angara-Eniseyskiy rayon. Vyp. 1. Enisey* [Surface water resources of the USSR. Vol. 16. Angara-Yenisei region. Iss. 1. Yenisei]. Ed. by A.P. Muranov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1973. 373 p.
 17. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. T. 15. Altay i Zapadnaya Sibir. Vyp. 2. Srednyaya Ob* [Surface water resources of the USSR. Vol. 15. Altai and Western Siberia. Iss. 2. Middle Ob]. Ed. by O.N. Panina. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972. 408 p.
 18. Loucks D.P., Van Beek E. *Water resources systems planning and management. An Introduction to Methods, Models and Applications*. Turin, UNESCO Publ., printed by Ages Arti Grafiche, 2005. 679 p.
 19. Budyko M.I. *Teplovoy balans zemnoy poverkhnosti* [Heat balance of the earth's surface]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1956. 256 p.
 20. Mezentsev V.S. *Gidrologicheskie raschety v meliorativnykh tselyakh* [Hydrological calculations in reclamation purposes]. Omsk, Omsk SKHI Publ., 1982. 84 p.
 21. *Metodicheskie rekomendatsii po uchetu vliyaniya khozyaystvennoy deyatel'nosti na stok malyykh rek pri gidrologicheskikh raschetakh dlya vodokhozyaystvennogo proektirovaniya* [Guidelines to incorporate the impact of economic activity on the runoff of small rivers with hydrological calculations for water management design]. Ed. by E.E. Bulakhovskiy. Leningrad, Goskomgidromet Publ., 1986. 168 p.
 22. Hendriks M.R. *Introduction to Physical Hydrology*. Oxford; New York, Oxford University Press, 2010. 331 p.
 23. *Rukovodstvo po gidrologicheskoy praktike. T. II. Upravlenie vodnymi resursami i praktika primeneniya gidrologicheskikh metodov* [Guide to Hydrological Practices. V. II. Water management and the practice of hydrological methods]. Geneva, Switzerland, 2012. 324 p.
 24. Schreiber P. Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa (German). *Meteorol. Zs.*, 1904, vol. 21, ss. 441–452.
 25. Feller W. *An introduction to probability theory and its applications*. Vol. 2. Second ed. New York; London; Toronto, John Wiley&Sons, Inc., 1971. 738 p.
 26. *Vodnye resursy i vodny balans territorii Sovetskogo Soyuza* [Water resources and water balance of the territory of the Soviet Union]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1967. 199 p.
 27. *Stroitelnye normy i pravila. Chast II. Razdel A. Glava 6. Stroitel'naya klimatologiya i geofizika. SNiP II-A.6–72* [Building Regulations. P. II. Section A. Ch. 6. Building climatology and geophysics. SNiP II-A.6–72]. Moscow, Gosstroy SSSR, 1973. 320 p.
 28. Kuzin P.S., Babkin V.I. *Geograficheskie zakonomernosti gidrologicheskogo rezhima rek* [Geographic patterns of the hydrological regime of rivers]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1979. 200 p.
 29. Gusev E.M., Nasonova O.N. *Modelirovanie teplo- i massoobmena poverkhnosti sushy s atmosferoy* [Modelling of heat and mass transfer of the land surface to the atmosphere]. Moscow, Nauka Publ., 2010. 327 p.
 30. Bradshaw R.H.M., Sykes M.T. *Ecosystem Dynamics. From the past to the future*. Chichester, West Sussex, UK, John Wiley & Sons, Ltd., 2014. 321 p.
 31. Mujumdar P.P., Nagesh Kumar D. *Floods in a Changing Climate. Hydrologic Modelling*. New York, Cambridge University Press, 2012. 177 p.
 32. Rychagov G.I. *Obshchaya geomorfologiya* [General geomorphology]. Moscow, MSU Publ., 2006. 416 p.
 33. Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Borisova O.K. River runoff decrease in North-Eurasian plains during the Holocene optimum. *Water Resources*, 2012, vol. 39, no. 1, pp. 69–81.
 34. *Handbook of applicable mathematics*. Eds. E. Lloyd, W. Lederman. Vol. VI. P. A. Chichester; New York; Brisbane; Toronto; Singapore, John Wiley&Sons, Inc., 1984. 510 p.
 35. Naydenov V.I. *Nelineynaya dinamika poverkhnostnykh vod sushy* [Nonlinear dynamics of surface water]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 318 p.
 36. Gelfan A.N. *Dinamiko-stokhasticheskoe modelirovanie formirovaniya talogo stoka* [Dynamic-stochastic modeling of snowmelt runoff formation]. Moscow, Nauka Publ., 2007. 279 p.
 37. *Stroitel'naya klimatologiya. SNiP 23–01–99** [Building Climatology. SNiP 23–01–99*]. Moscow, Gosstroy GUP CPP, 2003. 162 p.
 38. Groisman P.Ya., Blyakharchuk T.A., Chernokulsky A.V. Climate changes in Siberia. *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*. Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. Dordrecht, Springer, 2013. Ch. 3, pp. 57–110.
 39. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR. Ser. 3. Mnogoletnie dannye. Chasti 1–6. Vyp. 20. Tomskaya, Novosibirskaya, Kemerovskaya oblasti, Altayskiy kray* [Scientific and Applied Climate Handbook. Series 3. Long-term data. Parts 1–6. Vol. 20. Tomsk, Novosibirsk, Kemerovo Regions, Altai Territory]. St-Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1993. 718 p.
 40. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR. Ser. 3. Mnogoletnie dannye. Chasti 1–6. Vyp. 17. Tyumenskay i Omskaya oblasti* [Scientific and Applied USSR Climate Reference Book. Series. 3. Long-term data. Parts 1–6. Vol. 17. Tyumen and Omsk regions]. St-Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1998. 702 p.
 41. Lapshina E.D., Muldiyarov E.Ya. Osnovnye ehapy razvitiya Bolshogo Vasyuganskogo bolota [Main Stages of Great Vasyugan swamp formation]. *Bolshoe Vasuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Big Vasyugan bog. Current status and development]. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ., 2002. pp. 36–44.
 42. Pologova N.N., Lapshina E.D. Nakoplenie ugleroda v torfyanykh zalezakh Bolshogo Vasuganskogo bolota [Carbon accumulation in peat bog deposits of the Great Vasyugan]. *Bolshoe Vasuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Big Vasyugan bog. Current status and development]. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ., 2002. pp. 174–179.
 43. Maloletko A.M. *Evolutsiya rechnykh sistem Zapadnoy Sibiri v mezozoe i kaynozoe* [Evolution of the river systems of Western Siberia in the Mesozoic and Cenozoic]. Tomsk, TGU Publ., 2008. 288 p.
 44. Akhteryakova A.V., Leshchinsky S.V. Results of comprehensive research of two Holocene peatlands of the Tobolsk-Irtysh lithofacies area. *Tomsk State University Journal*, 2014, no. 385, pp. 171–180. In Rus.
 45. Derevyanko A.P., Molodin V.I., Zenin V.N., Leshchinsky S.V., Mashchenko E.N. *Pozdnepaleoliticheskoe mestonakhozhdenie Shestakovo* [Paleolithic Shestakovo location]. Novosibirsk, Institute of Archeology and Ethnography of the Russian Academy of Sciences Publ., 2003. 168 p.

46. Molodin V.I., Novikov A.V., Marchenko Zh.V. Drevnyaya i srednevekovaya istoriya yuzhnogo Vasyuganya [Ancient and medieval history of the south Vasyugan]. *Bolshe Vasuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Big Vasyugan bog. Current status and development]. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ., 2002. pp. 5–29.
47. Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A. *Bolotnye sistemy Zapadnoy Sibiri i ikh prirodookhrannoe znachenie* [Bog of Western Siberia and their conservation value]. Tula, Grif i Ko Publ., 2001. 584 p.
48. Kuznetsov V.I., Kozlov N.I., Khomyakov P.M. *Matematicheskoe modelirovanie evolyutsii lesa dlya tseley upravleniya lesnym khozyaystvom* [Mathematical modeling of forest evolution for forest management]. Moscow, LENAND Publ., 2005. 232 p.
49. Savichev O.G., Paromov S.V. Hydrological aspects of bogs formation in taiga zone of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 154–161. In Rus.
50. Savichev O.G., Nguen V.L. The technique for determining background and extreme values of hydrogeochemical parameters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 9, pp. 133–142. In Rus.
51. Savichev O.G., Mazurov A.K., Pipko I.I., Sergienko V.I., Semilev I.P. Spatial Patterns of the Evolution of the Chemical Composition and Discharge of River Water in the Ob River Basin. *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 466, P. 1, pp. 47–51.
52. Georgiadi A.G. The change of the hydrological cycle under the influence of global warming. *Hydrology for the Water Management of Large River Bas*, 1991, no. 201, pp. 119–128.

Received: 15 April 2016.

Information about the authors

Oleg G. Savichev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Margarita V. Reshetko, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Yulia A. Moiseeva, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.