

УДК 551.4.012:551.435.134→551.89

© 2019 г. А.Ю. СИДОРЧУК^{1,*}, А.В. ПАНИН^{1,2}, О.К. БОРИСОВА²

**ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ВЕЛИЧИНЫ
РЕЧНОГО СТОКА В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ ПРОШЛОМ
(ст. 5. Сравнительный анализ результатов, полученных разными методами)**

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет, Москва, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия

*E-mail: aleksey.sidorchuk@geogr.msu.ru

Поступила в редакцию 01.11.2017

После доработки 09.05.2018

Принята к печати 09.10.2018

Для сравнительного анализа оценок расходов воды в палеореках по морфометрии палеорусел и на основе палеогеографической аналогии проведены определения основных гидрологических климатических показателей в районах-аналогах, полученных по ископаемым флорам из голоценовых (от современности до 10 тыс. л. н.), поздневалдайских (17–18 тыс. л. н.) и предмикулинских (~140 тыс. л. н.) отложений. Сравнение значений годового слоя стока, полученных по морфометрическим зависимостям и по уравнениям гидравлики, и снятых с карт слоя стока в районах-аналогах, показало вполне удовлетворительное соответствие этих величин. Относительная ошибка сопоставления для разных объектов находится в диапазоне ± 11 –23%, что не превышает средней ошибки оценки стока воды каждым из этих методов в отдельности. Однако ошибка $\pm 20\%$ значительна, и применять геоморфологические подходы можно только для оценки весьма существенных изменений стока воды в древних реках (в два раза и более) в среднем за многолетние периоды. Тем не менее, геоморфологические методы и палеогеографическая аналогия в настоящее время являются одними из основных путей реконструкции водных ресурсов в условиях климатов прошлого и построения сценариев водных ресурсов при возможных изменениях климата в будущем.

Ключевые слова: морфометрия палеорусел, густота речной сети, палеофлористический метод, сток воды, сравнительный анализ расчетов.

<https://doi.org/10.31857/S0435-42812019166-79>

**GEOMORPHOLOGICAL APPROACH TO THE RIVER RUNOFF EVALUATION
IN THE GEOLOGICAL PAST
(paper 5. Comparison of the estimates by different methods)**

A.Yu. SIDORCHUK^{1,*}, A.V. PANIN^{1,2}, O.K. BORISOVA²

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

²Institute of geography RAS, Moscow, Russia

*E-mail: aleksey.sidorchuk@geogr.msu.ru

Received 01.11.2017

Revised 09.05.2018

Accepted 09.10.2018

The estimates of water flow in the paleorivers with known paleochannel morphometry was compared with basic hydrological and climatic indicators found by paleogeographic analogy in the regions-analogues, determined by fossil flora analysis from the Holocene (from the present to 10 thousand years ago), the Late Valday (17–18 thousand years ago) and before the Eemian (~140 thousand years ago) deposits. Comparison of annual runoff depth obtained by regime equations and equations of hydraulics and taken from the hydrological maps in the regions-analogues, showed quite satisfactory compliance. Relative error of comparison for the different objects is in the range of ± 11 –23%, which does not exceed the average error of water flow estimation by each of these techniques separately. However, the error of $\pm 20\%$ is significant and geomorphological approaches can be applied only for the cases of sufficient changes in the water flow of ancient rivers (twice or more) and for long-term periods. Nevertheless, the use of geomorphological approaches and the method of paleogeographic analogy is now one of the main ways to reconstruct water resources in the past and to construct water resources scenarios for possible future climate changes.

Keywords: paleochannel morphometry, river network density, paleofloristic method, water flow, comparative analysis of the estimates.

Введение

Реконструкции величин стока воды в древних водотоках, полученные на основе информации о рельефе и коррелятных отложениях [1–4], необходимо верифицировать расчетами с помощью других, независимых методов. В современной гидрологии применяется несколько методов определения стока воды с неизученных и слабо изученных водосборов [5], из них два подхода — основные. Первый из них, метод расчета водного баланса, определяет величину поверхностного стока воды как разность между суммой осадков, с одной стороны, и испарением, аккумуляцией вод в наземных условиях и переходом их в грунтовые и подземные воды, с другой стороны. Этот метод применяется как для гидрологических расчетов, так и для палеореконструкций, а также для прогнозов водных ресурсов [6, 7]. При оценке стока древних рек на основе некоторых индикаторов проводятся реконструкции климатических характеристик для исследуемого периода в прошлом (обычно это температура воздуха, средняя за год и по сезонам, реже — слой осадков), а недостающие элементы водного баланса (практически всегда — испарение) рассчитываются. При оценке стока рек в будущем на основе климатических прогнозов рассчитываются все компоненты уравнения водного баланса. Часто для верификации климатических моделей будущего в качестве аналогов с известными оговорками используют палеоклиматические реконструкции [8].

Второй метод, географическая аналогия, опирается на гипотезу о сходстве условий формирования стока на водосборах со сходными климатическими и ландшафтно-морфологическими характеристиками [9]. При наличии такого сходства гидрологические характеристики переносятся с изученного в гидрологическом отношении аналога на неизученный водосбор. Этот метод часто применяется в современной проектной практике.

И уравнение водного баланса, и географическая аналогия могут быть использованы только при известных климатических характеристиках водосборов. Существует большое количество методов реконструкции палеоклиматов, так же как имеется множество моделей циркуляции атмосферы для расчета климатов будущего. В задачу статьи не входит сравнение различных подходов к решению этой проблемы.

Для независимых реконструкций палеоклиматов и стока воды в древних реках нами применяется географическая аналогия, модифицированная для палеорек, — так называемый метод палеогеографических аналогов [10]. На основе изучения состава ископаемых растительных остатков (главным образом, пыльцы и спор) при помощи метода ареалограмм [11] определяются ближайшие современные районы-

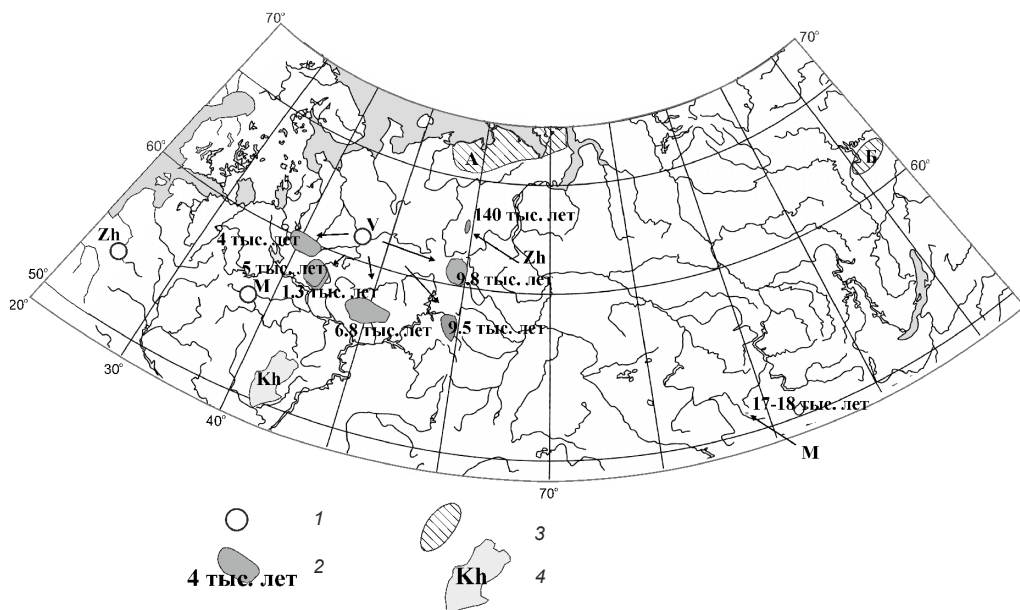


Рис. 1. Местоположения палеофлор и соответствующие центры концентрации с указанием возраста палеофлоры

1 — местоположения палеофлор и 2 — центры концентрации по палеофлорам (Zh — у с. Жукевичи (р. Неман), М — у д. Остров (Москва-река), V — у д. Байка (р. Вычегда)); 3 — равнинный аналог для центра концентрации палеофлоры М (А — этап холодно и влажно, Б — этап холодно и сухо); 4 — Kh — бассейн р. Хопер

аналоги для палеофлор, и для этих районов оцениваются гидроклиматические характеристики. Результаты оценок стока древних рек, полученные по морфометрии речных русел и русловых сетей [1–4] и с помощью палеогеографической аналогии, сравниваются между собой.

Палеофлористический метод реконструкции гидроклиматических условий

Количественные палеоклиматические реконструкции по палеоботаническим данным базируются на анализе климатических параметров, пригодных для обитания тех или иных видов растений, и на учете присутствия этих видов в составе ископаемой флоры. Для реконструкций палеоклимата по палеофлористическим данным могут быть использованы определения видов растений как по макроостаткам (плоды и семена, листья, древесина и проч.), так и по пыльце и спорам.

Метод количественных палеоклиматических реконструкций по палеофлористическим данным — так называемый метод ареалограмм — был предложен В.П. Гричуком [11]. Поскольку границы ареала растения определяются преимущественно его потребностями в теплообеспеченности и влажности, то климатические условия (основные гидроклиматические показатели) в районе, где в настоящее время совместно произрастает большинство видов ископаемой флоры (в так называемом районе-аналоге, или центре концентрации палеофлоры), должны соответствовать условиям места и времени формирования данной ископаемой флоры. Положение такого центра концентрации определяется путем построения ареалограммы, то есть посредством картографического “суммирования” ареалов всех видов данной ископаемой флоры. Территория, где современные климатические условия пригодны для обитания всех видов конкретной ископаемой флоры,

Сравнение величин слоя стока воды, рассчитанных методом морфометрических зависимостей, гидравлическим и по региону-аналогу для позднелевобережных рек Русской равнины

Таблица 1

Река	с.ш	в.д	F , км ²	W , м	Q , м ³ /с	X , мм	y	W_d , м	$Q_{m,r}$, м ³ /с	$X_{m,r}$, мм	$Q_{m,hyd}$, м ³ /с	$X_{m,hyd}$, мм	X_{analog} , мм
Москва	55.63	37.78	8170	150	54.6	200	3.9	530	210	790	5400	230	680±760
Протва	55.22	36.5	1800	60	19.5	345	3.5	220	60	1020	1600	55	980
Сытва	51.65	35.33	6310	120	29.1	145	3.85	480	175	910	6000	230	1160

F – площадь водосбора; W и W_d – ширина современного и древнего русла в бровках поймы; Q и X – современный среднегодовой расход воды и годовой слой стока; y – параметр внутригодовой изменчивости стока (см. формулу (1)), вычисленный по формулам (3) и (4); $Q_{m,r}$ – среднегодовой расход в палеорусле, рассчитанный по морфометрической зависимости (см. [1]); $X_{m,r}$ – годовой слой стока, рассчитанный по $Q_{m,r}$; $Q_{m,hyd}$ – расход при руслонаполнении в палеорусле, рассчитанный по формулам гидравлики (см. [2]); Q_{analog} – среднегодовой расход в палеорусле, рассчитанный по $Q_{m,hyd}$ и y ; $X_{m,hyd}$ – годовой слой стока, рассчитанный по $Q_{m,hyd}$ и X_{analog} – годовой слой стока, вычисленный по слою осадков и коэффициенту стока в районах-аналогах.

Оценка гидрометеорологических характеристик для низовьев р. Вычелды

Таблица 2

Возраст, л. н.	По регионам-аналогам			По морфометрическим зависимостям								
	Регион-аналог	Координаты центра		Слой стока, мм	Слой осадков, мм	Индекс па-леорусла	Ширина па-леорусла, м	у	Расход воды		Слой стока, мм	Слой осадков, мм
									м³/с	средне-максимальный		
9875	Бассейн Колвы	61	57	380	850	Б	1300	15	1600	10650	420	935
9450	Бассейн Чусовой	57.5	59	190	630	Б-В	1000	12	981	8111	255	850
9015						В	600	12	485	4145	125	
6850	Средняя Вятка	57.5	49	200	640	В-Г	700	8	460	5895	120	380
5070	Бассейн Уньки	58.5	44	250	720	Г	800	17	910	5295	240	685
4080	Верховья Сухоны	59.5	39.5	330	750	Г-Совр.	1100	10	990	9870	260	585
1300	Бассейн Уньки	58.5	44	250	720	Совр.	1100	17	1400	8100	365	1050
Совр.	Бассейн Вычелды	61.3	47	300	700	Совр.	1100	16	1160	7950	300	700

обычно сравнительно невелика. Предполагается, что и по составу фитоценозов эта территория является ближайшим современным аналогом для места и времени формирования данной палеофлоры.

Для анализа оценок расходов воды в палеореках с изученной морфометрией определены основные климатические показатели в районах-аналогах, полученные по ископаемым флорам из трех опорных разрезов (рис. 1). В двух из этих местонахождений проведен спорово-пыльцевой анализ датированных флювиальных отложений, заполняющих фрагменты голоценовых (нижняя Вычегда) [12] и поздневалдайских палеорусел (р. Москва) [13]. Еще одна, наиболее древняя из рассмотренных ископаемых флор определена по макроостаткам, извлеченным из предмикулинских отложений в долине р. Неман у дер. Жукевичи [14, 15]. По этим флорам построены центры современной концентрации видов растений и количественно оценены климатические характеристики районов-аналогов: для предмикулинского времени (московское позднеледниковье, около 140 тыс. л. н.), для интервала 17–18 тыс. л. н. и для большей части голоцена, с 10 тыс. л. н. до современности (здесь и далее приведен калиброванный возраст). Реконструированы температуры воздуха, слой палеоосадков и палеостока, а также параметр внутригодовой неравномерности стока воды в местах обнаружения палеофлор (табл. 1, 2).

Сопоставление результатов палеоклиматических и палеогидрологических реконструкций, полученных разными методами

Для московского позднеледниковья на основании анализа структуры ложбинно-балочной сети рассчитан слой стока для бассейна р. Хопер. Слой стока составлял 600–700 мм, то есть превосходил современный более чем в 7 раз; близкие оценки получены как для всего бассейна Хопра [16], так и для небольшого водосбора балки Переполье [3]. Район-аналог для палеофлоры московского позднеледниковья из разреза у д. Жукевичи (бассейн р. Неман) расположен на западном макросклоне северного Урала (рис. 1). Усредненные значения слоя осадков и слоя стока для всего этого региона, включающего и тайгу, и тундру, составили 1000 и 600 мм; если же ориентироваться только на тундровую часть региона, показанного на рис. 1, – то 1200 и 1000 мм, соответственно. Современные показатели для района, где обнаружена данная ископаемая флора, составляют 550–600 мм для осадков и 170–190 мм для стока, т.е. палеоосадки там были в 1.8–2 раза больше современных, а палеосток – в 3.5–5 раз больше современного. В свете концепции существования слабо дифференцированной перигляциальной гиперзоны [17] близкие абсолютные величины палеостока для столь удаленных друг от друга районов, как бассейны Немана и Хопра, вполне объяснимы. Меньшая, чем в бассейне Хопра, хотя и весьма существенная, разница между палео- и современным стоком в бассейне Немана объясняется характером современной дифференциации климата.

Для валдайского позднеледниковья наибольший интерес представляет период 17–18 тыс. л. н., когда на огромной территории перигляциальной зоны Северного полушария Земли были активны большие реки с шириной русла в 5–15 раз больше современной [18]. Для этого периода выявлен регион-аналог по ископаемой флоре из отложений, заполняющих палеорусло Москвы-реки у дер. Остров [13]. Он расположен на Алтае, к югу от Телецкого озера, в бассейне нижнего течения р. Чулышман (рис. 1). В этом районе сочетаются сообщества альпийских лугов и горной тундры, лиственничных и кедровых лесов. Климат района холодный и влажный: средняя температура июля 12 °С, января – -19 °С, годовой слой осадков 850–950 мм. Исходя из зимних температур воздуха в этом регионе-аналоге, коэффициент стока для периода половодья можно принять равным 0.8. Это дает

слой стока воды $680 \div 760$ мм, или в 3.7–4.2 больше современного в бассейне Москвы-реки.

Для расчетов стока воды по морфометрическим зависимостям [1] и по формулам гидравлики [2] необходимо получить значение параметра внутригодовой изменчивости стока для района-аналога. Использовать напрямую гидрологические характеристики района-аналога для оценки внутригодовой изменчивости стока палео-Москвы-реки невозможно из-за того, что район-аналог в бассейне р. Чулышман, как и все остальные районы-аналоги, расположен в горах. На равнинной территории близкие климатические характеристики (зимние и летние температуры воздуха) и ландшафты находятся в Большеземельской тундре в бассейне р. Печоры и ее притоков (территория отмечена индексом “А” на рис. 1). Основная часть годового стока воды на этих реках формируется в половодье, однако существенную долю (20–30%) составляют воды летних паводков. Предполагается [19], что в поздневалдайских реках сток проходил только в период короткого и дружного половодья с максимальным расходом воды Q_{max} . Поэтому в параметре внутригодовой неравномерности стока

$$y = 100 (Q_m / Q_{max}) \quad (1)$$

для рек Большеземельской тундры среднегодовой расход воды Q_m заменялся приведенным к году стоком в период половодья Q_{m-f} :

$$Q_{m-f} = 1000 \frac{h_f F}{T} \quad (2)$$

Здесь h_f – слой стока в период половодья, мм; F – площадь водосбора реки в км²; T – число секунд в году; коэффициент приводит единицы расхода воды к м³/с.

Параметр внутригодовой изменчивости стока y изменяется с площадью водосбора реки из-за распластывания волны половодья по длине реки [1]. После модификации этого параметра для рек Большеземельской тундры была получена связь

$$y_m = 2.0 F^{0.075} \quad (3)$$

с коэффициентом достоверности $R^2 = 0.34$ для водосборов площадью менее 10000 км² и

$$y_m = 0.17 F^{0.33} \quad (4)$$

с коэффициентом достоверности $R^2 = 0.75$ для более крупных водосборов. Слабая корреляция между y и F для небольших речных бассейнов объясняется как недостаточной гидрологической изученностью таких водосборов в условиях тундры и лесотундры, так и относительно малой скоростью распластывания половодья на малых и средних реках. Зависимости (3) и (4) с модифицированным параметром y_m для рек Большеземельской тундры совпадают с аналогичными связями, полученными для рек бассейна р. Вилюй (рис. 2). Этот бассейн служит равнинным аналогом для горных районов-аналогов, полученных по палеофлорам более сухих и холодных периодов валдайского позднеледникового (отмечен индексом “Б” на рис. 1). Здесь не было необходимости приводить параметр y к периоду половодья, так как объемы стока за половодье и за год на реках бассейна Вилюя практически одинаковы.

Для бассейна Москвы-реки у д. Остров с площадью водосбора 8170 км² параметр внутригодовой изменчивости стока по формуле (3) равен 3.9. С этим значением метод

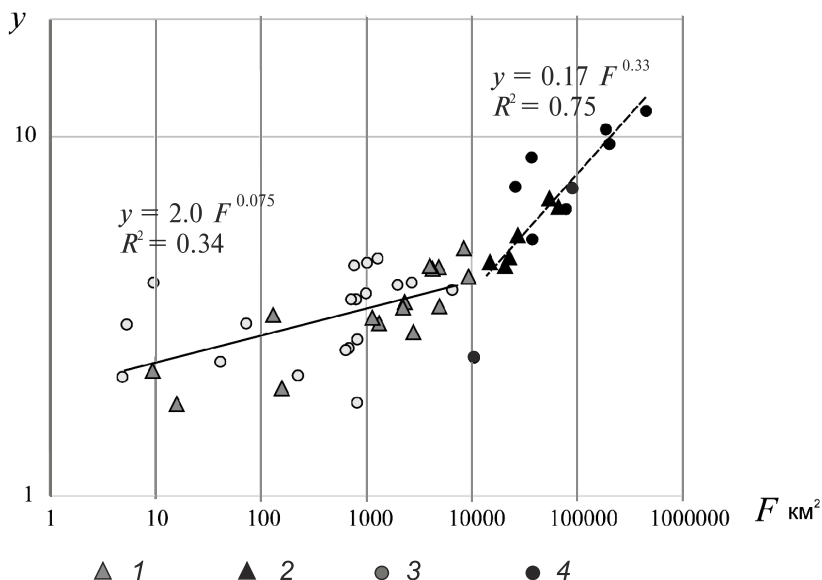


Рис. 2. Зависимость показателя внутригодовой неравномерности стока от площади водосбора
Водосборы бассейнов рек Большеземельской тундры площадью, км²: 1 – ≤ 10000 , 2 – > 10000 .
Водосборы рек бассейна р. Вилюй площадью, км²: 3 – ≤ 10000 , 4 – > 10000

морфометрических зависимостей при ширине палеоруслу 530 м показал среднегодовой расход воды 200 м³/с и слой стока 790 мм (табл. 1). По морфометрии фрагментов этого палеоруслу и составленному по результатам бурения поперечному профилю также проведены оценки стока воды. Гидравлический метод показал расход воды при руслонаполнении 5400 м³/с [2]. При значении $y = 3.9$ среднегодовой расход составляет 210 м³/с. Сравнение значений годового слоя стока, полученных тремя методами, показывает их вполне удовлетворительное соответствие: относительная ошибка не превосходит 11% (табл. 1).

Еще для двух поздневалдайских палеорусел, расположенных в бассейнах Протвы и Свапы, можно сопоставить результаты расчета палеостока, проведенные двумя разными морфометрическими методами (табл. 1). Здесь также соответствие полученных значений вполне удовлетворительное: относительная ошибка не превосходит 12%.

Голоценовые палеорусла

Все три метода были использованы для реконструкции стока воды в низовьях р. Вычегды в голоцене [12]. Здесь в ходе врезания реки в отложения третьей террасы после спуска подпорного озера сформировались серия террас и ступенчатая пойма с палеоруслами разного размера и возраста (рис. 3).

Формирование хорошо выраженного палеоруслу “Б” в виде крутой излучины с островами и побочнями на нижней ступени второй террасы завершилось в бореальное время. Это русло было активно в раннем бореале, примерно 10.0 тыс. л. н. Его ширина составляет 1300 м (в расширениях – до 1.5 км), шаг излучин основного русла – около 6–7 км, шаг вторичной извилистости – 4 км. По данным бурения, глубины при уровнях руслонаполнения могли достигать 8–10 м на перекатах. Анализ ареалов видов палеофлоры с возрастом около 9.8 тыс. л. показал, что в этот период в долине Вычегды были развиты темнохвойные леса среднетаежного облика. Современный район-аналог для этой ископаемой флоры выявлен в верховьях р. Колвы, на границе темнохвойной горной тайги со средне- и южно-

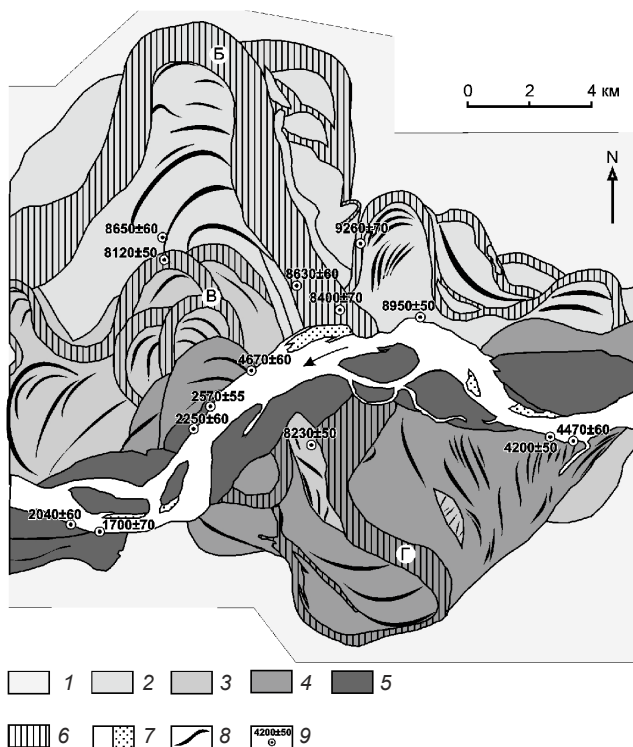


Рис. 3. Система голоценовых палеорусел нижней Вычегды (ниже г. Сольвычегодска)
 Террасы: 1 – третья, 2 – вторая, 3 – первая; ступени поймы: 4 – верхние, 5 – нижние; 6 – палеорусла; 7 – современное русло и высокие пески; 8 – гряды на террасах и пойме; 9 – радиоуглеродные даты. Б–Г – индексы палеорусел, обсуждаемых в тексте

таежными сосновыми лесами (рис. 1). Современный климат этого региона более континентальный и суровый, чем в низовьях Вычегды. Температура января во время формирования этой палеофлоры была на 3.5°C ниже, а июля – на 0.5°C ниже современной, годовой слой осадков составлял 850 мм. Коэффициент стока был равен 0.45 для года и 0.63 для весеннего сезона. Исходя из гидрологической аналогии для таких ландшафтов, параметр y был близок к современному: $y = 15$. Среднегодовой расход раннебореального русла, вычисленный по его ширине с учетом значения параметра u , составлял примерно $1600 \text{ м}^3/\text{с}$, среднемаксимальный расход воды был около $10650 \text{ м}^3/\text{с}$ (табл. 2). Годовой слой стока 420 мм. С учетом коэффициента стока в регионе-аналоге, это дает годовой слой осадков 935 мм – максимальный за всю послеледниковую историю Вычегды.

Меандрирующее палеорусло “В”, расположенное на самой древней поверхности среднего террасового комплекса (I нпт), было заилено в конце бореального периода, около 9.5 тыс. л. н. Его средняя ширина составляет 600 м, а шаг излучин – 3500 м, уклон – $0.07\text{--}0.08^{\circ}/_{00}$. Из системы палеорусел в низовьях Вычегды это характеризуется наименьшими размерами. Столь же малы (по сравнению с современными) староречья на пойме р. Виледи – левого притока Вычегды, образованные в раннеатлантическое время, около 8.5 тыс. л. н.

Имеются две палеофлоры, датированные около 9.5 и 6.8 тыс. л. н. Современный регион-аналог флоры возрастом 9.5 тыс. л. н. находится в верховьях Чусовой. Здесь южная темнохвойная горная тайга уральского типа граничит с темнохвойными лесами. Континентальность этого климата еще высока; температура января была на 2.5°C ниже современной, температура июля почти на 1°C выше; годовой слой

осадков несколько меньше современного (630 мм). Регион-аналог для флоры возрастом 6.8 тыс. л. н. располагается в средней части бассейна Вятки, покрытого хвойно-широколиственными лесами. Летние температуры того периода в низовьях Вычегды превышали современные почти на 2 °С, а зимние соответствовали современному уровню. Безморозный период был почти на месяц длиннее, чем сейчас. Осадков выпадало около 640 мм. Годовой коэффициент стока в обоих регионах-аналогах около 0.3. Параметр u для первого региона-аналога равен 12, для второго — 8. Внутригодовая неравномерность стока за период 9.5–6.8 тыс. л. н. увеличивалась, продолжая тенденцию, характерную для более раннего времени.

Расчет стока для времени формирования палеорусл “В” проведен по измеренной ширине палеорусл и интерполированному значению параметра $u = 12$. Сильная изогнутость грив, малые ширина и шаг извилин русла показывают, что водоносность пра-Вычегды резко уменьшилась. Среднегодовой расход воды, судя по ширине палеорусл, снизился до 485 м³/с, среднемаксимальный расход воды — до 4145 м³/с (табл. 2). Годовой слой стока составлял 125 мм. На исследованном участке поймы Вычегды в это время (примерно между 7.3 и 8.8 тыс. л. н.) прервалось осадконакопление [12].

Маловодье конца бореального времени продолжалось и в раннеатлантическое время. Ширина и шаг излучин раннеатлантического русла Виледи соответствуют среднему расходу воды 29 м³/с, что в 1.6 раз меньше современного. Регион-аналог низовьев Вычегды атлантического времени характеризуется малым количеством осадков и относительно высоким испарением. По-видимому, минимальный сток воды на Вычегде приходился на конец этого времени, примерно 6.8 тыс. лет назад (табл. 2).

В пойменном рельефе Вычегды хорошо сохранились массивы наиболее древних пойменных ступеней — 4-й и 3-й, с сегментно-гривистым первичным рельефом, указывающим на меандрирование пра-Вычегды во время их формирования. Начало их образования относится к суббореальному периоду голоцена — около 5 тыс. л. н. Эти ступени составляют шпоры двух крупных смежных палеоизлучин, расположенных слева от современного русла Вычегды и занятых сейчас протокой Старая Вычегда. По рисунку пойменных грив видна последовательность смещения и искривления этих палеоизлучин. В районе дер. Дурницыно за время между 4200 и 4470 ¹⁴С лет (чему соответствует после калибровки промежуток времени в 215–425 кал. лет) русло сместилось на 440 м, следовательно, скорость смещения на стадии еще пологой излучины составляла 1–2 м/год.

Регионы-аналоги, полученные по флорам возрастом около 5.0 и 4.0 тыс. л. н., показывают существенное уменьшение континентальности климата. Современный аналог флоры возрастом около 5 тыс. л. н. выявлен в северной части южной тайги в бассейне Унжи. Регион-аналог флоры возрастом 4 тыс. л. н. находится в бассейне Сухоны, у северной граница южной тайги, в области широкого распространения торфяных болот. Для этого времени впервые характерно превышение температур января (–13 °С) над современными на 1 °С, а температуры июля (18 °С) были на 1 °С ниже, чем в предыдущую стадию. Выпадало несколько больше осадков (720 и 750 мм соответственно), слой стока был 250 и 300 мм. В начале суббореала внутригодовое распределение стока воды отличалось малой изменчивостью ($u = 17$). Это хорошо соотносится со значительной кривизной омеговидных излучин палеорусл. Согласно расчету по морфометрическим зависимостям, в начале этапа среднегодовой расход воды составлял 910 м³/с, среднемаксимальный расход — около 5300 м³/с (табл. 2). Расчеты гидравлическим методом дают несколько меньший расход при руслонаполнении — 4150 м³/с. Слой стока был 240 мм. Исходя из коэффициента стока по регионам — аналогам, годовой слой осадков составлял 685 мм.

Изменчивость стока (исходя из данных по региону-аналогу) увеличилась в конце суббореального времени: $u = 10$. Судя по датировкам отложений в староречье

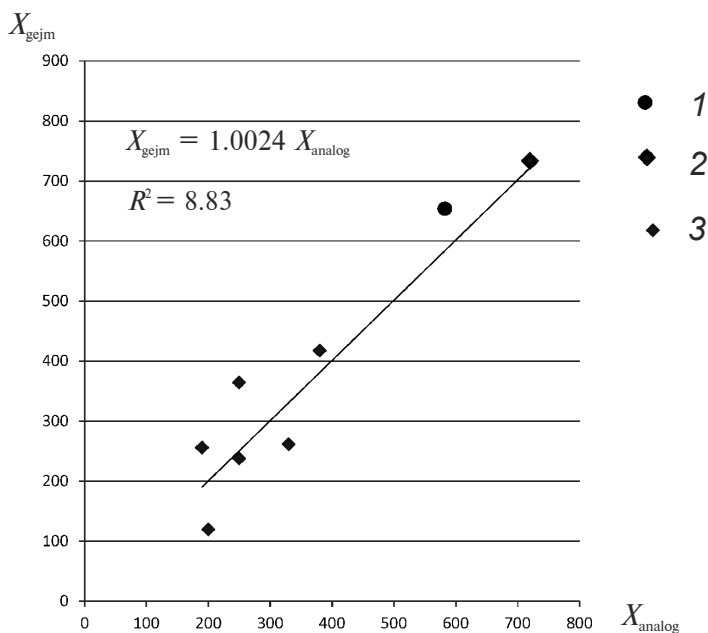


Рис. 4. Соответствие величин слоя стока в бассейнах древних рек, вычисленных на основе геоморфологических подходов (X_{geom}) и измеренных в регионах-аналогах (X_{analog})
Бассейн: 1 – р. Хопер, 2 – р. Москвы, 3 – р. Вычегды

палеорула “Г” у пос. Вычегодский, оно в этот период уже было отшнуровано от основного русла. Вероятно, морфодинамический тип русла изменился — оно стало разветвленно-извилистым, подобным современному. Излучины, которые формировались в период 4–5 тыс. л. н., были спрямлены и начали отмирать. В таком случае, расчеты по морфометрическим зависимостям для конца суббореала дают средний расход воды $990 \text{ м}^3/\text{с}$, среднемаксимальный — $98700 \text{ м}^3/\text{с}$, слой стока и слой осадков — 260 и 585 мм, соответственно.

В начале субатлантического периода начали формироваться поверхности нижних ступеней поймы. Расчеты по морфометрическим зависимостям показывают, что годовой сток воды в субатлантике мог быть максимальным около 1.3 тыс. л. н., но в регионе-аналоге соответствующего возраста сток был меньше (табл. 2). К настоящему времени среднегодовой расход воды несколько уменьшился до $1160 \text{ м}^3/\text{с}$, а среднегодовое количество осадков составляет 700 мм.

В целом соответствие величин слоя стока, полученных морфометрическими методами и в регионах-аналогах, вполне удовлетворительное (рис. 4). Относительная ошибка между величинами, полученным по морфометрическим зависимостям и по регионам-аналогам, составляет $\pm 23\%$, что укладывается в точность оценок стока воды в рамках геоморфологических подходов.

Заключение

Геоморфологические подходы к оценке величины речного стока в геологическом прошлом хорошо вписываются в систему методов определения гидрологических характеристик неизученных водосборов [5]. Морфометрические зависимости, формулы гидравлики, методы вычисления критических скоростей потока, математические модели формирования эрозионного рельефа позволяют получать количественные

оценки стока воды в древних реках. Морфометрические и литологические индикаторы стока воды в древних реках, такие как морфометрия палеорусел на горизонтальной плоскости (ширина палеорусел и шаг излучин) и на поперечных вертикальных разрезах (характеристики живого сечения), густота современной и погребенной русловой и эрозионной сети, крупность частиц аллювиальных отложений, сравнительно несложно выявляются в ходе полевых и камеральных изысканий на обширных территориях. Достаточно часто имеется палеогеографическая (в первую очередь, палеофлористическая) информация для применения палеогеографической аналогии, необходимой для реализации геоморфологических подходов. Хотя палеофлористический анализ по палино-логическим данным сложнее стандартного палинологического анализа и требует соответствующей подготовки палинолога, результативность метода ареалограмм существенно превышает возможности многих других способов получения палеоклиматических данных.

Результаты расчетов стока воды с помощью разных геоморфологических индикаторов вполне удовлетворительно соответствуют друг другу и данным, полученным по палеогеографической аналогии палеофлористическим методом. Создается возможность для картографирования характеристик стока древних рек, таких как среднегодовой и среднемаксимальный расход воды, для определенных этапов в прошлом на обширных территориях. Для равнин Северной Евразии такие карты построены на основе использования морфометрических зависимостей и палеогеографической аналогии как для отдельных речных бассейнов (Волги, Дона, Днепра), так и для всей территории, для оптимума голоцена около 7 тыс. л. н. и для времени начала терминации Валдайского ледникового покрова около 17–18 тыс. л. н. [19–21]. Имеется реальная возможность построить такого рода карты для времени начала терминации Московского ледникового покрова около 140 тыс. л. н. на основе анализа густоты погребенной речной сети того времени [3].

Геоморфологические подходы к оценке стока древних рек не лишены недостатков. Во-первых, ошибки оценок морфометрических характеристик древних рек часто велики, особенно при использовании разбуренных поперечных профилей через палеоруслу. Морфометрические зависимости характеризуются большим разбросом, их точность не превышает $\pm 20\%$. Изменения морфологии русел рек происходят за длительные периоды времени (для крупных и средних рек это сотни лет) и при значительных изменениях величины и режима стока.

Разные методы вычисления стока воды опираются на взаимосвязанные данные. При расчетах по морфометрическим зависимостям применяются коэффициенты внутригодовой неравномерности стока u , полученные по гидроклиматическим характеристикам регионов-аналогов. Однако структура формул (8) и (9) в [1] для оценки среднегодовых расходов воды такова, что величины ширины русла на результат расчета влияют более чем вдвое сильнее, чем внутригодовая неравномерность стока. Расчет расхода воды при уровне руслонаполнения не зависит от выбора региона-аналога, но переход от руслонаполняющего (среднемаксимального) к среднему за год расходу воды полностью определяется величиной u в регионе-аналоге. При сравнении расходов воды, вычисленных по морфометрическим и гидравлическим зависимостям, нужно учитывать, что величина ширины русла при уровне руслонаполнения входит как в морфометрические зависимости (8) и (9) в [1], так и в формулу (1) в [2], применяемую в методе гидравлического расчета. Кроме того, величина глубины русла, входящая в формулы (1) и (2) в [2] в некоторой степени коррелирует с шириной русла. Значения слоя осадков, которые рассчитываются по величинам стока воды, полученным морфометрическими методами, определяются величинами коэффициента стока, которые зависят от выбора региона-аналога. К сожалению, не всегда можно найти палеофлору необходимого возраста в том же месте, где имеются данные о морфометрии древних русел этого возраста (и наоборот). В этом случае степень удовлетворительности соответствия результатов расчетов приходится оценивать с привлечением дополнительных соображений.

Все это позволяет применять геоморфологические подходы для оценки только весьма существенных изменений стока воды в древних реках (в два раза и более) в среднем за многолетние периоды. Тем не менее, геоморфологические методы и палеогеографическая аналогия в настоящее время являются одними из основных путей реконструкции водных ресурсов в условиях климатов прошлого и построения сценариев водных ресурсов при возможных изменениях климата в будущем.

Благодарности. Работа выполнена по темам госзадания: “Эволюция и трансформация эрозионно-руслowych систем в условиях изменения природной среды и антропогенных нагрузок” (А.Ю. Сидорчук) и “Динамика и механизмы изменения ландшафтов, климата и биосферы в кайнозое, история четвертичного периода” тема (№ 0148-2019-0005) (О.К. Борисова, А.В. Панин); оценки стока для валдайского позднеледникового проведены в рамках проекта РНФ 17-17-01289.

Acknowledgements. This study contributes to the State Tasks “Evolution and Transformation of Erosion-Channel Systems under the Conditions of Changes in the Natural Environment and Anthropogenic Stress” (A.Yu. Sidorchuk) and “Dynamics and mechanisms of landscape, climate and biosphere changes in the Cenozoic, history of the Quaternary period” (№ 0148-2019-0005) (O.K. Borisova, A.V. Panin); runoff estimates for the Valdai lateglacial were carried out within the framework of the Russian Science Foundation project 17-17-01289.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидорчук А.Ю., Панин А.В. Геоморфологические подходы к оценке величины речного стока в геологическом прошлом (Ст. 1. Морфометрические зависимости) // Геоморфология. 2017. № 1. С. 55–65.
2. Сидорчук А.Ю., Панин А.В. Геоморфологические подходы к оценке величины речного стока в геологическом прошлом (Ст. 2. Гидравлические методы реконструкции расходов палеорек) // Геоморфология. 2017. № 2. С. 3–13.
3. Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К., Еременко Е.А. Геоморфологические подходы к оценке величины речного стока в геологическом прошлом (Ст. 3. Анализ структуры сети водотоков) // Геоморфология. 2018. № 1. С. 18–32.
4. Сидорчук А.Ю., Панин А.В. Геоморфологические подходы к оценке величины речного стока в геологическом прошлом (Ст. 4. Анализ крупности руслового аллювия для определения скоростей палеопотоков) // Геоморфология. 2018. № 3. С. 40–51.
5. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. СПб: Нестор-История, 2009. 193 с.
6. Беляев А.В., Георгиади А.Г. Средний годовой сток в оптимумы последнего межледникового и голоцена // Палеоклиматы и палеоландшафты внетропического пространства Северного полушария. Поздний плейстоцен – голоцен. Атлас-монография. М.: ГЕОС, 2009. С. 29–30.
7. Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М., Соколичина Н.Н., Суркова Г.В., Торопов П.А., Чернышев А.В., Чумаченко А.Н. Прогноз климатической ресурсо-обеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. М.: Макс-Пресс, 2008. 292 с.
8. Дроздов О.А. О надежности использования аналогов прошлого для прогнозов водного режима на будущее // Водные ресурсы. 1992. № 4. С. 7–12.
9. Евстигнеев В.М. Речной сток и гидрологические расчеты. М.: Изд-во МГУ, 1990. 304 с.
10. Sidorchuk A.Yu. and Borisova O.K. Method of paleogeographical analogues in paleohydrological reconstructions // Quaternary International. 2000. Vol. 72(1). P. 95–106.
11. Гричук В.П. Опыт реконструкции некоторых элементов климата северного полушария в атлантический период голоцена // Голоцен. М.: Наука. 1969. С. 41–57.
12. Sidorchuk A., Borisova O., Kovalyukh N., and Panin A. Lateglacial and Holocene palaeohydrology of the lower Vychegda // River basin sediment systems: Archives of environmental change. Amsterdam: Swets & Zeilinger B.V, 2001. P. 265–296.
13. Sidorchuk A., Panin A., and Borisova O. Morphology of river channels and surface runoff in the Volga River basin (East European Plain) during the Late Glacial period // *Geomorphology*. 2009. Vol. 113. No. 3–4. P. 137–157.
14. Величкевич Ф.Ю. Плейстоценовые флоры ледниковых областей Восточно-Европейской равнины. Минск: Наука и техника, 1962. 239 с.
15. Литвинюк Г.И. Новые данные о флоре Жукевичей (р. Горница) на Немане // Советская палеокарпология. М.: Наука, 1979. С. 145–152.

16. Sidorchuk A., Panin A., and Borisova O. Surface runoff to the Black Sea from the East European Plain during the Last Glaciation Maximum–Late Glacial time // Geological Society of America Special Paper. 2011. Vol. 473. P. 1–25.
17. Величко А.А. Природный процесс в плейстоцене. М.: Наука, 1973. 256 с.
18. Панин А.В., Сидорчук А.Ю. Макроизлучины (“большие меандры”): проблемы происхождения и интерпретации // Вестн. МГУ. Сер. 5: География. 2006. № 6. С. 14–22.
19. Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К. Климатически обусловленные изменения речного стока на равнинах Северной Евразии в позднеледниковье и голоцене // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 4. С. 406–416.
20. Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К. Снижение стока рек равнин Северной Евразии в оптимум голоцена // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 1. С. 40–53.
21. Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Чернов А.В. Основные этапы формирования пойм равнинных рек Северной Евразии // Геоморфология. 2011. № 3. С. 20–31.

REFERENCES

1. Sidorchuk A.Yu. and Panin A.V. Geomorphological approach to the river runoff evaluation in the geological past. Paper 1. Regime equations. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2017. No. 1. P. 55–65. (in Russ.)
2. Sidorchuk A.Yu. and Panin A.V. Geomorphological approach to the river flow evaluation in the geological past. Paper 2. Hydraulic methods of paleoriver discharge reconstruction. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2017. No. 2. P. 3–13. (in Russ.)
3. Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Borisova O.K., and Eremenko E.A. Geomorphological approach to the river flow evaluation in the geological past. Paper 3. Drainage net structure analysis. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2018. No. 1. C. 18–32. (in Russ.)
4. Sidorchuk A.Yu. and Panin A.V. Geomorphological approach to the river runoff evaluation in the geological past. Paper 4. Sediment particle size analysis for estimation of paleoflow velocities. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2018. No. 3. C. 40–51. (in Russ.)
5. *Metodicheskiye rekomendatsii po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik pri otsutstviy dannykh gidrometricheskikh nablyudeniy* (Guidelines for determination of rated hydrological characteristics in the absence of hydrometric observations). Sankt-Petersburg: Nestor-Istoriya (Publ.). 2009. 193 p.
6. Belyaev A.V. and Georgiadi A.G. Annual runoff at the last interglacial and Holocene optima, in *Paleoklimaty i paleolandschafty vnetropicheskogo prostranstva Severnogo polushariya* (Paleoclimates and paleolandscapes of extra-tropical area of the Northern Hemisphere). Moscow: GEOS (Publ.), 2009. P. 29–30.
7. Kislov, A.V., Evstigneev, V.M., Malkhazova, S.M., Sokolikhina N.N., Surkova G.V., Toropov P.A., Chernyshev A.V. and Chumachenko A.N. *Prognoz klimaticheskoi resursoobespechennosti Vostochno-Evropeyskoi ravniny v usloviyakh potepleniya XXI veka* (A Forecast of Climate Resource Availability in East European Plain under XXI Century Warming). Moscow: Makspress (Publ.), 2008. 292 p.
8. Drozdov O.A. On the reliability of the use of analogues in the past for prediction the future water runoff. *Vodn. Resur.* 1992. No. 4. P. 7–12. (in Russ.)
9. Evstigneev V.M. *Rechnoi stok i gidrologicheskie raschety*. (River drainage and hydrological calculations). Moscow: MSU (Publ.), 1990. 304 p.
10. Sidorchuk A.Yu. and Borisova O.K. Method of paleogeographical analogues in paleohydrological reconstructions. *Quaternary International*. 2000. Vol. 72(1). P. 95–106.
11. Grichuk V.P. An attempt of reconstruction of certain climatic indexes of the northern hemisphere during the Atlantic stage of the Holocene, in *Golotsen* (Holocene). Moscow: Nauka (Publ.), 1969. P. 41–57.
12. Sidorchuk A., Borisova O., Kovalyukh N., and Panin A. Lateglacial and Holocene palaeohydrology of the lower Vychevga, in *River basin sediment systems: Archives of environmental change*. Amsterdam: Swets & Zeilinger B.V, 2001. P. 265–296.
13. Sidorchuk A., Panin A. and Borisova O. Morphology of river channels and surface runoff in the Volga River basin (East European Plain) during the Late Glacial period. *Geomorphology*, 2009. Vol. 113. No. 3–4. P. 137–157.
14. Velichkevich F.Yu. *Pleystotsenovyie flory lednikovyykh oblastey Vostochno-Evropeyskoy ravniny* (Pleistocene floras of the glacial regions of the East European Plain). Minsk: Nauka i tekhnika (Publ.) 1962. 239 p.
15. Litvinyuk G.I. New data about the flora at Zhukevichy (Gornitsa) on the Neman River, in *Sovetskaya paleokarpologiya* (Soviet paleocarpology). Moscow: Nauka (Publ), 1979. P. 145–152.
16. Sidorchuk A., Panin A., and Borisova O. Surface runoff to the Black Sea from the East European Plain

during the Last Glaciation Maximum—Late Glacial time. *Geological Society of America Special Paper*. 2011. Vol. 473. P. 1–25.

17. Velichko A.A. *Prirodnyi protsess v pleystotsene* (Natural Process in the Pleistocene). Moscow: Nauka (Publ), 1973. 256 p.
18. Panin A.V. and Sidorchuk A.Yu. Macromeanders: the problem of origin and interpretation. *Vest. Mos. Univ. Ser. Geogr.* 1973. No. 6. P. 14–22. (in Russ.)
19. Sidorchuk A.Y., Panin A.V., and Borisova O.K. Climate-induced changes in surface runoff on the North-Eurasian plains during the Late Glacial and Holocene. *Vodn. Resur.* 2008. Vol. 35. No. 4. P. 386–396. (in Russ.)
20. Sidorchuk A.Y., Panin A.V., and Borisova O.K. River runoff decrease in North Eurasian plains during the Holocene optimum. *Vodn. Resur.* 2012. Vol. 39. No. 1. P. 69–81. (in Russ.)
21. Panin A.V., Sidorchuk A.Yu., and Chernov A.V. Main stages of floodplain formation in North Eurasian rivers. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2011. No. 3. P. 20–31. (in Russ.)