УДК 551.435.11:551.89(1-924.85/.86) DOI: 10.34753/HS.2023.5.2.172

ПАЛЕОГИДРОЛОГИЯ РЕК БАССЕЙНА РЕКИ ДОН

А.Ю. Сидорчук[1], О.К. Борисова[2], А.В. Панин[2]
[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», г. Москва, Россия;
[2]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт географии РАН», г. Москва, Россия
fluvial05@gmail.com

Аннотация. На основе морфометрии палеорусел реконструирован гидрологический режим крупных меандрирующих рек, существовавших в бассейне реки Дон 18–14 тыс. лет назад. Для палеогидрологических реконструкций применялся метод морфометрических зависимостей, полученных на основе гидравлической геометрии речных русел – связи между шириной русла и средним максимальным расходом воды и отношения между максимальным расходом половодья и площадью водосбора. Реконструированные палеовеличины максимального суточного слоя поверхностного стока в период снеготаяния составили на севере бассейна р. Дон, в перигляциальной лесостепи, до 120 мм/сут и в центральной части бассейна, в перигляциальной степи, 20–30 мм/сут. Средний по бассейну суточный максимальный слой стока составил около 50 мм, что более чем в шесть раз превышает современное значение. Годовой сток рек был рассчитан по соотношению среднего за половодье и среднего максимального слоя стока с помощью упрощенной модели снеготаяния с учетом температур воздуха на территориях современных аналогов климата и ландшафтов бассейна р. Дон в древности. Общий годовой сток с территории бассейна р. Дон составлял около 113 км^3, что в четыре раза больше современного стока из того же бассейна. Из этих оценок годового и особенно максимального стока следует наличие обильных зимних осадков при

PALEOHYDROLOGY OF RIVERS IN THE DON RIVER BASIN

Aleksey Yu. Sidorchuk[1], Olga K. Borisova[2], Andrei V. Panin[2]
[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "M.V. Lomonosov Moscow State University", Moscow, Russia;
[2] Federal State Budgetary Institution of Science "Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences", Moscow, Russia

fluvial05@gmail.com

Abstract. The hydrological regime of large meandering rivers that existed in the Don River basin 18–14 thousand years ago was reconstructed using paleochannel hydraulic geometry, in particular, bankfull width. For paleohydrological reconstructions, the method of regime equations was used. The relationship between the channel bankfull width and the average maximum discharge is derived from the data on the modern channels. This equation is applied for calculating the maximum discharges of the paleorivers using bankfull width of paleochannels. Then, relationships are constructed between the calculated maximum paleodischarges and catchment areas for the territories within the Don River basin with homogeneous paleolandscapes. On this basis, specific discharges are calculated for elementary catchments. They do not depend on the catchment area and therefore can be mapped. The reconstructed maximum daily specific discharges during the snowthaw period were up to 120 mm/day in the north of the Don River basin, in the periglacial forest steppe, and 20–30 mm/day in the central part of the basin, in the periglacial steppe. The average daily maximum runoff depth for the basin was about 50 mm, which is more than six times higher than the current value. The annual river runoff was calculated from the ratio of the average flood and the average maximum runoff depth using a simplified snowthaw model, taking into account air temperatures within the modern region-analogues. The total annual runoff from the territory of the Don River basin was about 113 km^3, which is four times the modern runoff from

Sidorchuk A. Yu., Borisova O.K., Panin A. V. Paleohydrology of rivers in the Don River basin. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2023, vol. 5, iss. 2, pp. 172–190. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2023.5.2.172

коротком и быстром снеготаянии в период формирования больших палеорусел.

Ключевые слова: большие меандрирующие реки; переход от ледниковой эпохи к межледниковью; максимальный суточный слой стока; среднегодовой сток.

the same basin. From these estimates of the annual and especially maximum discharges, it follows that there was abundant winter precipitation with short and rapid snowmelt during the formation of large paleochannels.

Keywords: large meandering rivers; transition from the glacial to interglacial epoch; maximum daily runoff depth; annual runoff.

Введение

Крупные извилистые реки прошлого были открыты в конце 19 века [Докучаев, 1878; Davis, 1895]. Их русла были значительно крупнее современных в тех же водосборных бассейнах. Первоначально происхождение этих крупных рек объясняли местными факторами: наличием озер в долинах рек или речными перехватами. В 1950–1960-х годах после работ Дж. Дьюри [Dury, 1954, 1964, 1965], И.А. Волкова [Волков, 1960, 1963], С.А. Шамма [Schumm, 1965, 1968] и Н.И. Маккавеева с соавторами [Маккавеев, Хмелева, Гун Го-юань, 1969] стало ясно, что это явление имеет глобальное распространение и обусловлено глобальными климатическими условиями времени перехода от ледниковой эпохи к межледниковью (голоцену), которые отличались от современных. Эти авторы основали количественную палеогидрологию, основанную на морфологических показателях в гидрологии. Использовались три основные способа палеогидрологических реконструкций:

1. Расчет стока палеорек по палеоклиматическим реконструкциям с использованием уравнений водного баланса [Schumm, 1965].
2. Расчет скорости течения и расхода в палеореке для заданного уровня на основе геометрии поперечного сечения, уклона палеореки и гидравлических сопротивлений [Dury, 1965; Rotnicki, 1991].
3. Расчет стока по морфометрическим зависимостям на основе гидравлической геометрии палеорусла [Dury, 1965; Маккавеев, Хмелева, Гун Го-юань, 1969].

Все эти методы широко обсуждались и применялись для реконструкции речного стока по всему миру. В результате были получены такие палеогидрологические характеристики, как средний максимальный и среднегодовой сток, например, для рек на территориях Западной и Центральной Европы [Popov, Marković, Štrbac, 2008; Vandenberghe, Sidorchuk, 2019], Восточно-Европейской равнины [Сидорчук, Панин, Борисова, 2008] и Западной Сибири [Волков, 1963].

Эти количественные оценки палеорасходов бывших крупных рек оказались значительно выше расходов современных рек тех же бассейнов. Хотя Дж. Дьюри перечислил возможные причины этого явления [Dury, 1965, стр. 15], обсуждение этих вопросов показало общее недоверие к результатам количественных реконструкций палеостока. Причиной такого недоверия является устоявшееся мнение о сухости климата конца последнего оледенения и об отсутствии атмосферных осадков, достаточных для формирования этих больших палеорусел. Таким образом, существует дилемма: или большие палеорусла были сформированы процессами, не требующими увеличения количества выпадавших осадков, или климатические условия времени перехода от эпохи оледенения к межледниковью существенно отличались от общепризнанных.

Удобным пространством для разрешения этого противоречия являются низменности Северного полушария, особенно бассейн р. Дон. Во-первых, в бассейне р. Дон как нигде лучше сохранились многочисленные фрагменты крупных извилистых палеорусел. Во-вторых, для бассейна р. Дон сразу отпадает часто называемая причина формирования больших палеорусел – сток вод таявшего материкового ледника, и остаются только особенности климата.

Как было отмечено в [Панин, Сидорчук, 2006], количественные палеогидрологические реконструкции призваны решить три главные проблемы:

1. Геоморфологическую: каковы механизм и время образования больших меандрирующих палеорусел, многократно превосходивших по размерам современные речные русла?

2. Гидрологическую: какими были гидрологический режим, максимальный и годовой расходы воды, создавшие такие большие палеорусла?

3. Палеогеографическую: каковы были ландшафтно-климатические условия, обеспечившие необходимые параметры стока?

В данной статье мы анализируем распространение и размеры палеорек в бассейне р. Дон, используем морфометрические зависимости для выявления гидрологического режима этих рек прошлого и на основании палеогидрологической аналогии реконструируем климатические условия их формирования.

Материалы исследований

Распространение и морфология палеорусел в бассейне р. Дон

Как уже указывалось во введении, бассейн реки Дон представляет собой уникальный объект для палеорусловых и палеогидрологических исследований. Во-первых, в отличие от других рек Восточно-Европейской равнины и Западной Сибири, в бассейне р. Дон реки были врезаны практически на всем их протяжении в период формирования палеорусел (рисунок 1). Уровень Черного моря в тот период контролировался условиями стока в проливах Босфор и Дарданеллы и был не выше –64 м абс [Сидорчук, Панин, Борисова, 2018]. Устье Дона располагалось тогда на краю шельфа, отметки дна реки составляли –40 м абс в районе современного Керченского пролива, –15 м абс ниже устья р. Северский Донец [Неваленный, 2000]. На участке от устья р. Черная Калитва до устья р. Воронеж русло р. Дон было врезано на 10–12 м относительно современного уровня воды [Хруцкий, Смольянинов, Косцова, 1974].

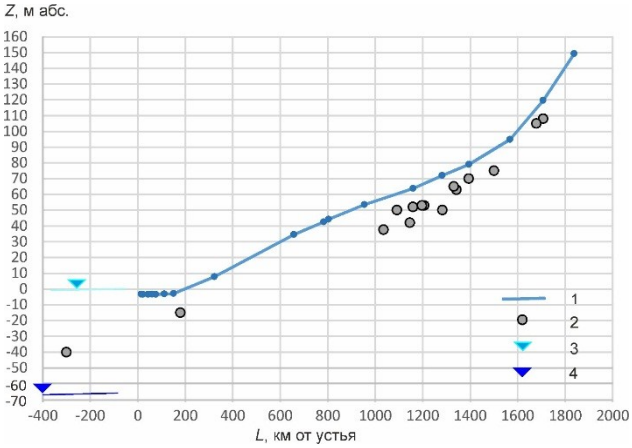


Рисунок 1. Продольный профиль р. Дон по подошве аллювия: 1 – современного и 2 – позднеледникового (по [Хруцкий, Смольянинов, Косцова, 1974; Неваленный, 2000]). Вершины треугольников показывают положение уровня моря: 3 – современного и 4 – позднеледникового (по [Сидорчук, Панин, Борисова, 2018]).

Figure 1. Longitudinal profile of the Don River along the base of alluvium: 1 – modern and 2 – Late Glacial (after [Khrutsky, Smolyaninov, Kostsova, 1974; Nevalenny, 2000]). The vertices of the triangles show the position of the sea level: 3 – modern and 4 – Late Glacial (according to [Sidorchuk, Panin, Borisova, 2018]).

Во-вторых, обычно остатки больших палеорусел распределены вдоль рек фрагментарно, с большими участками отсутствия таких остатков. Например, на территории Западной Сибири площадью более 3 млн км^2 выявлено только 64 участка с хорошо сохранившимися фрагментами палеорусел [Sidorchuk, 2023]. Фрагментарность палеорусел является одним из аргументов в пользу их неруслового происхождения [Рычагов, 2005]. На реках же бассейна р. Дон палеорусла прослеживаются практически на всем их протяжении, без существенных перерывов. Вероятно, хорошая сохранность палеорусел в бассейне р. Дон объясняется их врезанностью. Палеорусла или наследуются современными руслами (рисунок 2а), или представляют собой большие староречья на пойме (рисунок 2б). Основные типы соотношений древних и современных русел, выделенные по их морфологии, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные типы соотношений древних и современных русел.
Table 1. Main types of relationships between ancient and modern channels.

Индекс	Тип
A	современное русло полностью наследует палеорусло
B1	унаследованное русло с современными меандрами (пологими)
B2	унаследованное русло с современными меандрами (крутыми)
C	унаследованное русло с макроизлучинами палеорусла на пойме
D	унаследованное русло с современными излучинами с широкой древней поймой с макроизлучинами
E1	река с современными излучинами с широкой древней поймой с макроизлучинами
E2	река с пойменной многорукавностью с широкой древней поймой с макроизлучинами
F	река с современными излучинами (или пойменная многорукавность) на широкой пойме



Рисунок 2. Главные типы палеорусел в долинах рек бассейна р. Дон: а) унаследованные современными руслами (р. Хава около д. Ильиновка); б) в виде больших староречий на пойме (р. Медведица около д. Лысые горы) Космоснимки из Гугл Планета Земля.
Figure 2. The main types of paleochannels in the river valleys of the Don River basin: a) inherited by modern channels (the Khava River near Ilyinovka village); b) in the form of large oxbows on the floodplain (the Medveditsa River near Lysyye Gory village). Images from Google Earth.

Пространственное распространение главных типов соотношений древних и современных русел и величин отношения их ширин показано на рисунке 3. В низовьях р. Дон (в основном ниже устья р. Цимлы) река широкопойменная с пойменной многорукавностью и современными излучинами (тип F в таблице 1). Палеорусла на этом участке морфологически не выражены. Буровой профиль, проходящий через долину р. Дон в 16 км ниже устья р. Сал показывает мощную толщу аллювия, обозначенного как голоценовый и перекрывающего морские и аллювиальные карангатские отложения в широкой долине [Неваленный, 2000]. Подошва аллювия расположена на отметках –15 м абс, что соответствует рассматриваемому врезанному руслу палео-Дона. Вероятно, все следы врезанных палеорусел погребены под этой толщей.

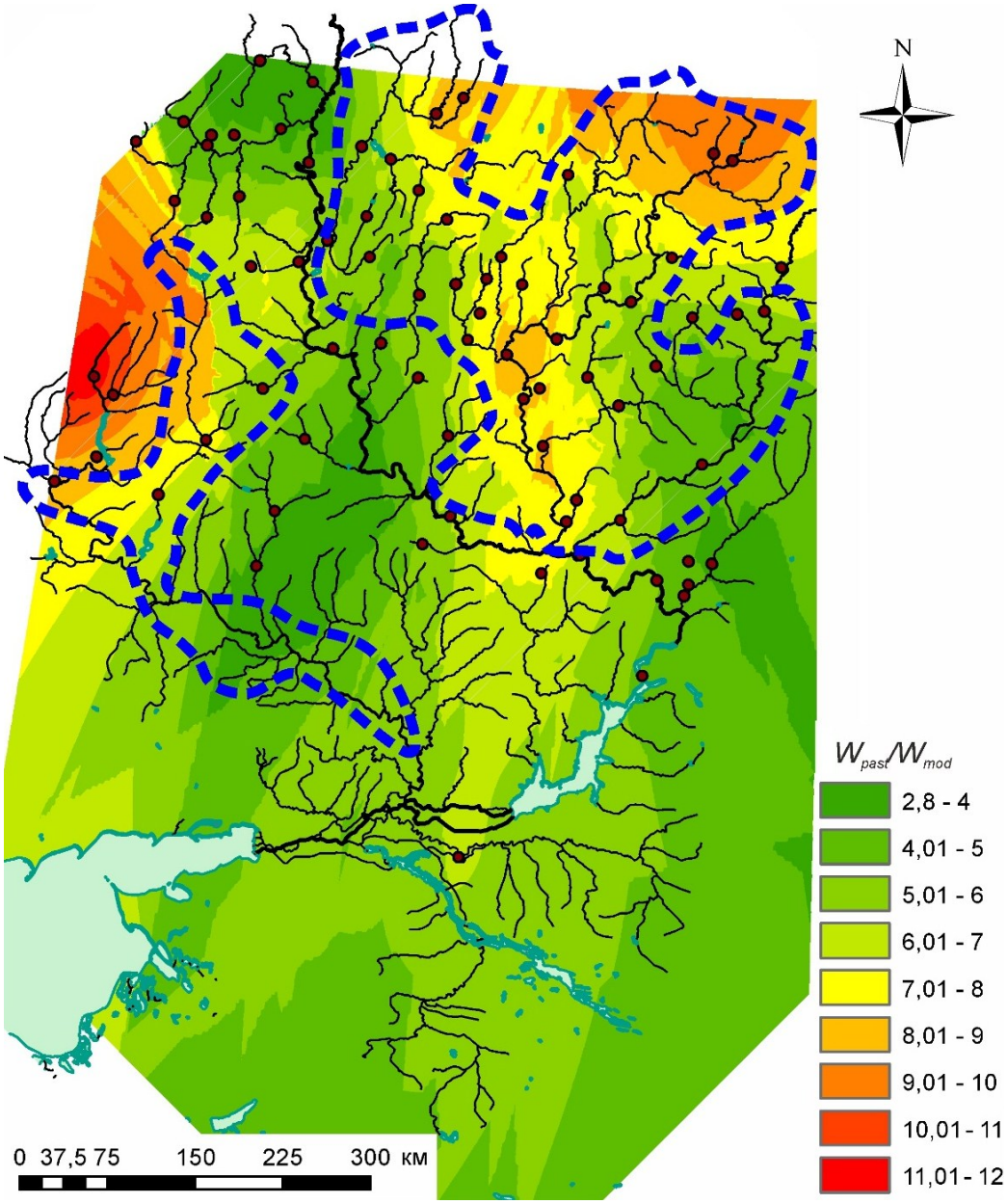


Рисунок 3. Пространственное распространение отношения ширин древних (W_{past}) и современных (W_{mod}) русел в бассейне р. Дон. Пунктиром выделены области преобладания русел типов D–E, где оценка этого отношения может быть завышена.

Figure 3. Spatial distribution of the ratio of the widths of ancient (W_{past}) and modern (W_{mod}) channels in the basin of the Don River. The dash lines mark the areas of predominance of channels of the D–E types, where this ratio can be overestimated.

На большей части бассейна р. Дон современные русла так или иначе унаследовали хорошо выраженные палеорусла, а пойма или практически отсутствует (типы A–B), или относительно узкая (тип C). Отношение ширин древних и современных русел в основном изменяется в пределах 3–7 и только в верховьях р. Северский Донец достигает 10–12. В бассейнах рек Битюг, Хопер, в среднем течении р. Северский Донец и р. Медведица пойма широкая (типы D–E). Здесь возможно относительное уменьшение ширин современных русел за счет распластывания потока половодья на пойме. Этим объясняются большие значения отношения ширин древних и современных русел, часто лежащие в диапазоне 7–12. Бурение на таких поймах показывает широкие и глубокие поперечные профили палеорусел [Панин, Сидорчук, Власов, 2013, рисунки 4 и 5; Матлахова, 2021]. Датирование вскрытых бурением отложений определяет время формирования палеорусел в диапазоне 18–14 тыс. лет назад (здесь и далее даты приведены к календарным годам).

Важной морфометрической характеристикой речных излучин является отношение шага излучин λ (расстояния по прямой между соседними точками смены знака кривизны оси русла) и ширины русла при уровне руслонаполнения W. Теоретически, это отношение определяется гидравлическими сопротивлениями и интенсивностью поперечной циркуляции потока на повороте [Сидорчук, 2020]. На практике для равнинных рек величина λ/W находится в диапазоне от 5 до 7 для свободных излучин и несколько большем – для врезанных излучин. Величина λ/W более 20 может служить признаком негидравлического происхождения такой излучины речного русла и невозможности использования ее морфометрии для палеогидрологических построений.

Для современных рек бассейна р. Дон отношение λ_{mod}/W_{mod} варьирует в диапазоне 4,3–12,5, распределение величин асимметричное, близкое к гамма-распределению (что характерно для этого показателя), среднее значение 7,5, стандартное отклонение 2,2. Для палеоизлучин λ_{past}/W_{past} (индекс «past» относит все величины к прошлому) варьирует в диапазоне 4–17, распределение величин также асимметричное, близкое к гамма-распределению, среднее значение 7,5, стандартное отклонение 2,3. Различия функций распределения статистически незначимые. Отсюда следует вывод, что морфология излучин палеорусел в бассейне р. Дон не отличается от морфологии современных излучин и может быть использована для палеогидрологических реконструкций.

На некоторых участках рек было невозможно измерить среднюю ширину палеорусел, но средний шаг излучин измерялся уверенно. В этих случаях ширина палеорусел восстанавливалась с помощью зависимости:

$$W_{past} = {\lambda_{past}}/{7{,}5} \qquad (1)$$

Гидрологические данные

В бассейне р. Дон измерения расхода воды проводятся более чем на 80 постах; в прошлом это количество было больше более чем в два раза. Данные наблюдений публиковались в гидрологических ежегодниках, и дважды было проведено обобщение этих данных: первое – за период от начала наблюдений до 1970 года [Протасьев, 1973], второе – от начала наблюдений до 2017 года включительно [Георгиевский, 2020]. В настоящем исследовании мы в основном опирались на данные, приведенные в первой обобщающей работе, так как гидрологический режим рек бассейна Дона существенно изменился в конце 1970-х годов, в первую очередь за счет уменьшения расходов воды половодья. В этом обобщении имеются сведения о расходах воды на 183 гидрологических станциях в диапазонах площадей водосбора от 0,06 до 378000 км^2 и средних максимальных среднесуточных расходов от 0,006 до 5620 м^3/с. На большинстве участков рек, где расположены эти станции, были измерены ширины и шаг излучин современных русел и палеорусел. Эта база данных существенно превышает по размерам ранее использованную в работе [Панин, Сидорчук, Власов, 2013].

Методы

Основным методом палеогидрологических реконструкций, принятым в данной работе, является метод морфометрических зависимостей на основе гидравлической геометрии палеорусла.

Этот метод, в приложении к меандрирующим руслам, был заложен в работах Н.И. Маккавеева [Маккавеев, Советов, 1940] и К. Инглиса [Inglis, 1947] и теоретически обоснован М.А. Великановым [1958]. Для палеогидрологических реконструкций на большой территории, в силу недостаточной информации о гидравлической геометрии палеорусел, возможно использовать только наиболее простые морфометрические зависимости, такие как связь между шириной русла при уровне руслонаполнения W и средним максимальным расходом половодья Q_{max} и связь между модулем стока на максимуме половодья q_{max} и площадью водосбора F.

Определение связи между шириной русла и расходом воды

Связь между шириной русла W и расходом воды может быть получена для одного створа при разных уровнях воды и для разных створов по длине реки при единой кривой свободной поверхности или, что применяется чаще, при расходе воды одинаковой обеспеченности. Обычно таким расходом воды является расход при уровне руслонаполнения в бровках поймы. Руслонаполняющий расход воды обычно близок к среднему максимальному расходу Q_{max} и так называемому руслоформирующему расходу, действие которого на русло равнозначно среднему действия всех расходов воды, составляющих гидрограф. Обычно такая связь записывается в виде:

$$W = a_0 Q_{max}^{b_0} \qquad (2)$$

Аналогичного вида морфометрические зависимости записываются для остальных главных гидравлических характеристик: скорости U и глубины D потока, уклона свободной поверхности S, а также для таких связанных с шириной русла показателей, как шаг излучин λ и радиус их кривизны R.

Для целей количественной палеогидрологии зависимость (2) записывается в виде

$$Q_{max} = aW^b \qquad (3)$$

Был проведен анализ зависимостей (2) и (3) для бассейнов рек, протекающих в самых разных природных условиях и с самыми разными гидрологическими режимами, таких как реки современной перигляциальной зоны (р. Лена) и экваториальных лесов (р. Амазонка), а также древние реки, для которых расходы воды были вычислены по уравнениям гидравлики [Сидорчук, Украинцев, Панин, 2021]. Этот анализ показал, что если использовать именно среднемаксимальные расходы воды, то эти зависимости близки (практически одинаковы в пределах доверительного интервала 95 %) для самых разных рек, например, для таких как Лена и Амазонка. Если же в зависимостях (2) и (3) использовать средний годовой расход воды, то единой связи не получается (см. рисунки 6 и 7 в [Sidorchuk, 2023]). Этот анализ подтверждает, что ширина речного русла является индикатором именно максимальных расходов воды, и что при палеогидрологических расчетах по измеренным ширинам палеорусел можно непосредственно получить только эти максимальные расходы.

Коэффициент a и показатель степени b в формуле (3) определяются по данным измерений и расчетов средних максимальных расходов половодья на гидропостах и измерений ширин русел современных рек в бровках поймы. Среднемноголетние расходы половодья древних рек Q_{max_past} рассчитываются по формуле (3) на основе измерений ширин палеорусел W_{past}.

Определение связи между модулем стока на максимуме половодья и площадью водосбора

Известно [Евстигнеев, 1990], что среднемноголетний расход воды на максимуме половодья Q_{max} нелинейно увеличивается с увеличением площади водосбора F:

$$Q_{max} = \frac{q_0 F}{(F+1)^n}\delta \qquad (4)$$

Здесь q_0 – модуль максимального стока на единичном водосборе, n – коэффициент редукции. При расчетах необходимо вводить коэффициенты изменения размерности, а также влияния озерности, заболоченности и залесенности водосбора δ.

Эффект нелинейности в зависимости (4) именуется редукцией модуля стока половодья и проявляется во всех больших речных бассейнах. Существует мнение [Ye et al., 2009], что наличие вечной мерзлоты в бассейне Лены этот эффект

нивелирует, но это мнение основано на использовании наблюдений на ограниченном числе гидрологических станций, расположенных только вдоль основного русла р. Лены, где связь (4) действительно линейная.

Линейность зависимости (4) характерна для малых водосборов, где происходит замедление редукции. Наблюдения показывают, что при площади водосбора меньше некоторой критической величины $F<F_{кр}$ показатель степени редукции становится равным нулю, а модуль максимального стока q_{max} для таких водосборов равен модулю стока на единичном водосборе q_0.

Для древних рек с известной площадью водосбора строятся зависимости (4) и рассчитываются среднемноголетние модули стока максимума половодья $q_{max_past} = Q_{max_past}/F$. Эти модули стока приводятся к площади водосбора $F_{кр}$ для получения максимального модуля стока древних рек на единичном водосборе $q_{max_кр_past}$, уже не зависящего от площади водосбора:

$$q_{max_кр_past} = \frac{q_{max_past}}{\left(F_{кр}+1\right)^n}(F+1)^n \qquad (5)$$

Способы оценки среднемноголетнего годового расхода воды древних рек

В руководствах по гидрологическим расчетам при отсутствии гидрометрических наблюдений рекомендуются редукционные формулы для оценки модуля стока максимума половодья по известному среднему слою стока за половодье h, например, [Евстигнеев, 1990]:

$$q_{max_кр_past} = \frac{q_{max_past}}{\left(F_{кр}+1\right)^n}(F+1)^n \qquad (6)$$

Здесь K_0 – параметр дружности половодья малого водосбора, который рекомендуется вычислять для рек-аналогов.

Для оценки слоя стока за половодье древних рек формулу (6) для водосбора с площадью $F<F_{кр}$ можно записать в виде:

$$h_{past} = \left(F_{кр}+1\right)^n \frac{q_{\max_past}}{\delta K_0} \qquad (7)$$

Зависимость типа (6) для малого водосбора можно также получить с помощью модели снеготаяния. В работе [Matveeva, Sidorchuk, 2020] предложена упрощенная модель поступления талых вод на элементарный водосбор, являющаяся синтезом моделей В.Л. Комарова [1961] и Ю.Б. Виноградова [1983].

Выбор современных аналогов

Выбор районов-аналогов для палеоландшафтов в современных условиях осуществляется на основе ландшафтно-гидрологической аналогии. Для палеорек был предложен принцип палеогидрологической аналогии, который базируется на близких предположениях: характеристики стока для древних речных бассейнов близки к характеристикам стока современных бассейнов с ландшафтными условиями, сходными с палеогеографическими [Sidorchuk, Borisova, 2000]. Основным методом определения границ района-аналога является палеофлористический анализ палеоботанических (в основном палинологических) данных [Гричук, 1969; Борисова, 2021]. Для датированных образцов аллювия палеореки определяется состав древней флоры. По картам современных ареалов видов растений-компонентов палеофлоры устанавливаются современные районы совместного произрастания всех этих растений или их большинства. Каждый такой район принимается в качестве современного ландшафтно-климатического аналога для бассейна данной палеореки соответствующего возраста, и внутри района-аналога определяются необходимые климатические показатели.

Сравнение с обобщенным эмпирическим методом

Палеогидрологические расчеты для рек Восточно-Европейской равнины и Западной Сибири проводились нами и ранее. Применялся полностью эмпирический метод, основанный на зависимости между шириной русла при уровне руслонаполнения и средним годовым расходом воды Q_{mean}:

$$Q_{mean} = 0{,}012y^{0{,}73}W^{1{,}36} \qquad (8)$$

Здесь

$$y = 100\frac{Q_{mean}}{Q_{max}} = aF^{0{,}125} \qquad (9)$$

Зависимость (8) была получена путем обработки данных по более чем 450 гидрологических станций в широком диапазоне ландшафтов от тундры до сухих степей

[Сидорчук, Панин, Борисова, 2008]. Коэффициент a и показатель степени в формуле (9) были определены для регионов-аналогов. Главным отличием формул (8) и (9) от изложенных выше является получение по ширине русла сразу среднего годового расхода воды на основе обобщенной эмпирической формулы. Такой подход делает неявной достоверно установленную и единственно правильную связь между шириной русла и максимальным расходом воды и нарушает изложенную выше логичную последовательность расчетов при палеогидрологических реконструкциях.

Обсуждение результатов

Связь между шириной русла и расходом воды для рек бассейна р. Дон

Искомая связь устанавливалась для современных рек с унаследованным руслом и узкой поймой (типы А–С в таблице 1). Не использовались данные по рекам, где влияние распластывания вод половодья на пойме на ширину русла существенно, а также по рекам с сухими или сильно заросшими растительностью руслами. Ширины рек в бровках поймы W_{mod}, м, измерялись по космическим изображениям с сайта Гугл-Планета, средние расходы максимума половодья Q_{max_mod} (м^3/с), получены из работы [Протасьев, 1973] для периода измерений до 1970 года с относительно стабильным гидрологическим режимом рек. Получена зависимость:

$$Q_{\max_mod} = 1{,}59W_{mod}^{1{,}39} \qquad (10)$$

с коэффициентом достоверности R^2 = 0.91 (рисунок 4). Значение показателя степени b находится в пределах 1,3–1,5, характерных для рек с самым разным гидрологическим режимом, от Лены до Амазонки. Значение коэффициента a для рек бассейна р. Дон несколько больше, чем для рек бассейнов Амазонки, Лены, Оби, т.е. при одинаковых расходах воды русла рек бассейна р. Дон более узкие. В то же время, зависимость (8) для рек бассейна р. Дон практически совпадает с таковой для рек бассейна Волги, которая была построена на основе большего количества измерений [Сидорчук, Украинцев, Панин, 2021].

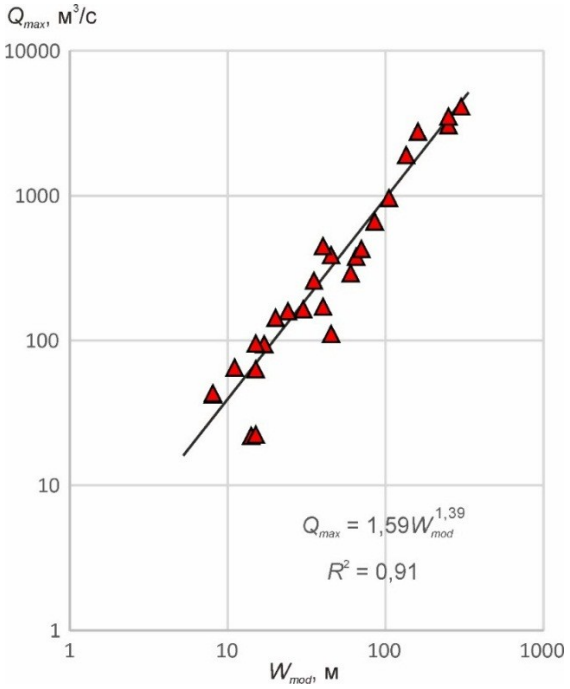


Рисунок 4. Связь между шириной русла в бровках поймы W и среднегодовым максимальным расходом воды Q_{max} для рек бассейна р. Дон (устанавливалась для современных рек с унаследованным руслом и узкой поймой, типы А–С в таблице 1).

Figure 4. Relationship between the bankfull width of the channel W and the average maximum water discharge Q_{max} for the rivers of the Don River basin (established for modern rivers with inherited channels and narrow floodplains, types A–C in Table 1).

Связь между модулем стока на максимуме половодья и площадью водосбора для палеорек бассейна р. Дон

Для палеорусел рек бассейна р. Дон с помощью зависимости (10) рассчитаны древние среднемноголетние максимумы расходов воды половодья Q_{max_past} и соответствующие модули стока q_{max_past}. На основе карты палеоландшафтов на максимум последнего оледенения [Гричук, 2002] в бассейне р. Дон выделены три области со сходными ландшафтами и, предположительно, сходными гидрологическими режимами палеорек. Для каждой такой области построены региональные связи вида (4) между Q_{max_past} и площадью водосбора F (рисунок 5). Показатели степени редукции n для областей перигляциальной лесостепи, для степной зоны с вечной мерзлотой и без нее статистически не различаются и приняты равными 0,29. Коэффициенты q_{0_past} меняются в зависимости от палеоландшафта, в целом уменьшаясь с севера на

юг. Таким образом, существенный разброс отношений расхода воды на максимуме половодья Q_{max_past} к площади водосбора (рисунок 5) объясняется не только ошибками измерений (которые могут быть значительными), но и закономерной географической неоднородностью исходных данных.

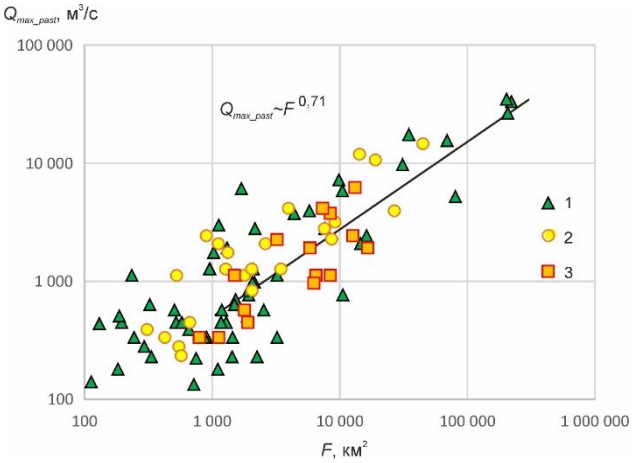


Рисунок 5. Связь между расходом воды на максимуме половодья Q_{max} и площадью водосбора F для палеорек бассейна р. Дон. Данные для водосборов, находившихся: 1 – в зоне перигляциальной лесостепи с вечной мерзлотой, 2 – в степной зоне с вечной мерзлотой, 3 – в степной зоне без мерзлоты.

Figure 5. Relationship between maximum water discharge at the flood Q_{max} and the catchment area F for the paleorivers of the Don River basin. Data for watersheds located: 1 – in the zone of periglacial forest-steppe with permafrost, 2 – in the steppe zone with permafrost, 3 – in the steppe zone without permafrost.

Распределение древнего модуля стока половодья по площади бассейна р. Дон

Для дальнейшего анализа модуля стока его необходимо привести к единичной (критической) площади водосбора. Зависимость, показанная на рисунке 5, не дает такой возможности из-за значительного разброса точек в области малых площадей водосборов в силу указанных выше причин. Поэтому для установления критической площади воспользуемся данными наблюдений на современных реках. Зависимость типа (4) для рек перигляциальной зоны с вечномерзлыми грунтами, а также для древних рек с Q_{max_past}, рассчитанными по формулам гидравлики, показала, что критическая площадь водосбора $F_{кр}$=1000 км² [Sidorchuk, 2023]. В бассейнах с площадями меньше критической величины максимальный расход воды изменяется с площадью водосбора линейно, а модуль стока от площади водосбора не зависит. Для современных рек бассейна р. Дон критическая площадь водосбора также близка к 1000 км² (рисунок 6). Эти наблюдения дают возможность и для древних рек бассейна р. Дон установить критическую площадь водосбора в 1000 км² и привести к этой площади модули стока максимума половодья древних рек:

$$q_{max_кр_past} = \frac{q_{max_past}}{(1000+1)^n}(F+1)^n \qquad (11)$$

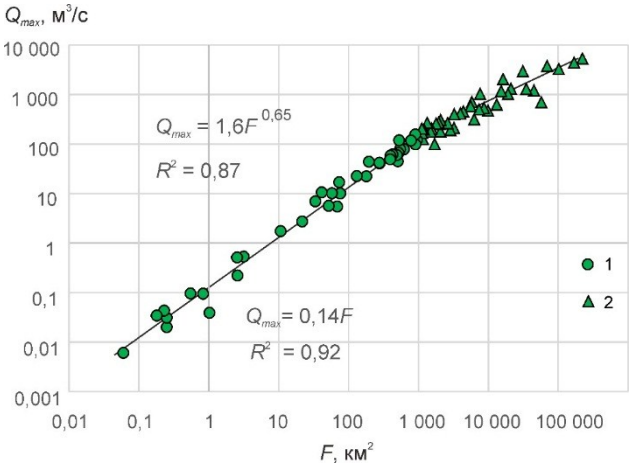


Рисунок 6. Связь между расходом воды на максимуме половодья Q_{max} и площадью водосбора F для современных рек бассейна р. Дон с площадями бассейнов <1000 км² (1) и >1000 км² (2).

Figure 6. Relationship between maximum water discharge at the flood Q_{max} and the catchment area F for modern rivers in the Don River basin with basin areas <1000 km² (1) and >1000 km² (2).

Такие модули стока близки к величинам слоя максимальной суточной водоотдачи во время снеготаяния h_{max_past} (без учета трансформации стока при склоновом сбегании). Поскольку приведенные модули стока не зависят от площади водосбора, их распределение может быть показано в изолиниях (рисунок 7).

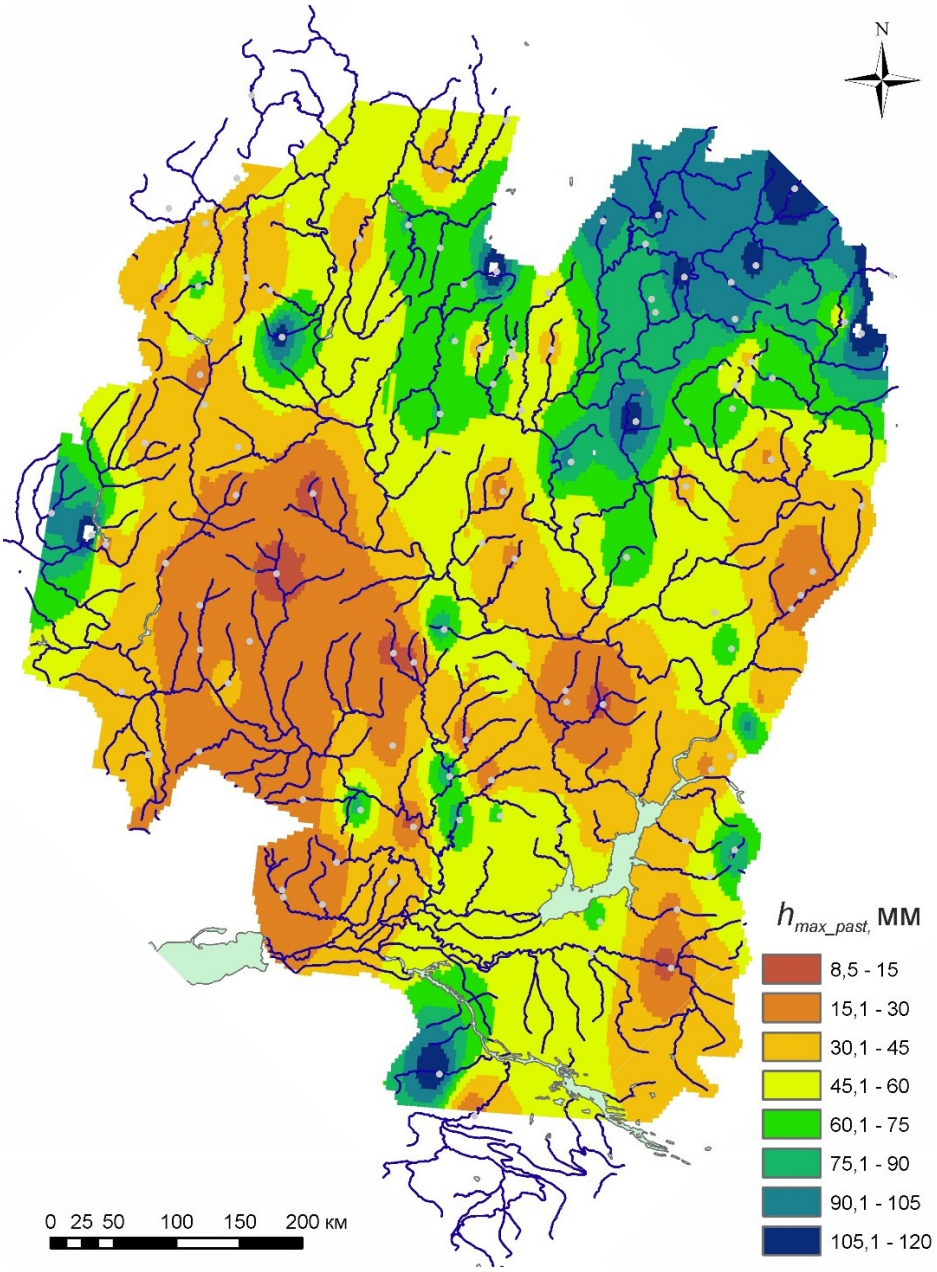


Рисунок 7. Распределение слоя максимальной суточной водоотдачи во время снеготаяния h_{max_past} (без учета трансформации стока при склоновом сбегании) для бассейна р. Дон в период формирования больших рек, 18–14 тыс. лет назад.

Figure 7. Distribution of the daily surface runoff depth during the snow thaw period h_{max_past} (without taking into account the transformation of hydrograph due to slope runoff) for the Don River basin during the formation of large rivers, 18–14 thousand years ago.

Изменение максимального модуля стока $q_{max_кр_past}$ по территории бассейна р. Дон вполне закономерно. Это подтверждает, что большой разброс точек на рисунке 6 связан не с ошибками измерений, а имеет географическую обусловленность. Хорошо выражена общая тенденция к уменьшению модуля стока с севера на юг, от перигляциальной лесостепи к степи, с последующим увеличением в южной области, по направлению к Кавказу. Средняя по бассейну величина максимального модуля стока составляла около 50 мм/сут, что в 6 раз больше соответствующего современного показателя. На севере и северо-западе бассейна максимальный модуль стока $q_{max_past_кр}$ достигал 120 мм/сут, в центральной области минимальных значений понижался до 10–30 мм/сут, что близко к современным максимумам этого показателя для северной части бассейна р. Дон.

В целом тенденция уменьшения модуля стока с севера на юг в прошлом совпадает с его современным пространственным распределением. Отличительной чертой является область увеличения $q_{max_past_кр}$ в прошлом на юге бассейна, которое можно связать с влиянием оледенения Кавказа. Очень большие величины $q_{max_past_кр}$, пропорциональные слою максимальной суточной водоотдачи на малых водосборах во время снеготаяния h_{max_past}, предполагают наличие в прошлом значительных запасов воды в снеге к началу весны и дружного весеннего снеготаяния.

Годовой сток воды древних рек в бассейне р. Дон

Переход от максимальных суточных величин стока к среднемноголетним годовым значениям при отсутствии гидрологических наблюдений невозможен без применения географической аналогии. Эта задача тем более сложна для древних ландшафтов определенного времени и территории, когда аналоги приходится искать в ландшафтах современных. Палеофлористический анализ дает такую возможность, но ограниченное количество изученных палеофлор определенного возраста и территории (для бассейна р. Дон имеется только одна палеофлора с возрастом 14 тыс. лет назад) заставляет использовать для поиска аналогов также данные по бассейнам Западной Двины, Днепра и Волги [Борисова, 2021]. Обоснованием такого подхода служит представление о формировании в эпоху последнего оледенения перигляциальной гиперзоны, в пределах которой географическая дифференциация ландшафтов была выражена существенно слабее, чем в современных условиях [Величко, 1973].

Современные центры концентрации видов изученных палеофлор в диапазоне возрастов 18–14 тыс. лет назад расположены в межгорных котловинах Алтая и Саян. Для этих территорий с климатических карт были сняты современные температуры января и июля, а также годовое количество осадков. По связи с зимними температурами проведена оценка коэффициентов стока. Для трех больших палеорек в центральной части Восточно-Европейской равнины с помощью формул гидравлики были проведены расчеты расхода воды при уровне руслонаполнения [Панин, Борисова, 2019]. В результате получено отношение слоя осадков и максимального модуля стока при снеготаянии $y = \frac{P_{\text{п}}}{q_{\max_past_кр}}$ (в единицах $\frac{\text{мм}}{\text{год}} / \frac{\text{мм}}{\text{сут}}$), приведенное к единичному водосбору с площадью менее 1000 км^2 (таблица 2). В пределах регионов-аналогов в межгорных котловинах Алтая и Саян можно подобрать такой ход современной температуры воздуха в весенний период, чтобы получить близкое отношение $P_{\text{п}}$ и $q_{max_кр}$. Расчеты по упрощенной (без учета испарения и осадков) модели снеготаяния [Matveeva, Sidorchuk, 2020] для температуры воздуха по метеостанции Кызыл в 2008 г. (рисунок 8а) и разных расчетных величин запасов воды в снеге, от 100 до 500 мм, дают линейную зависимость (рисунок 8б):

$$P_{\text{п}} = 5{,}3 q_{\max_кр} \qquad (12)$$

Таблица 2. Соотношения между слоями стока воды в половодье $P_{\text{п}}$ и максимальными модулями стока $q_{max_past_кр}$ для некоторых древних больших рек Восточно-Европейской равнины.

Table 2. Correlation between the depths of surface runoff during the flood $P_{\text{п}}$ and the maximum specific discharges $q_{max_past_кр}$ for some ancient large rivers of the East European Plain.

Река	F, км^2	Q_{max_past}, м^3/с	$q_{max_past_кр}$, мм/сут	$P_{\text{п}}$, мм	$P_{\text{п}}/q_{max_past_кр}$, мм/год:мм/сут
Москва	8170	5400	95	900	9,5
Протва	1800	1600	90	900	10,2
Свапа	6310	6000	130	450	3,5

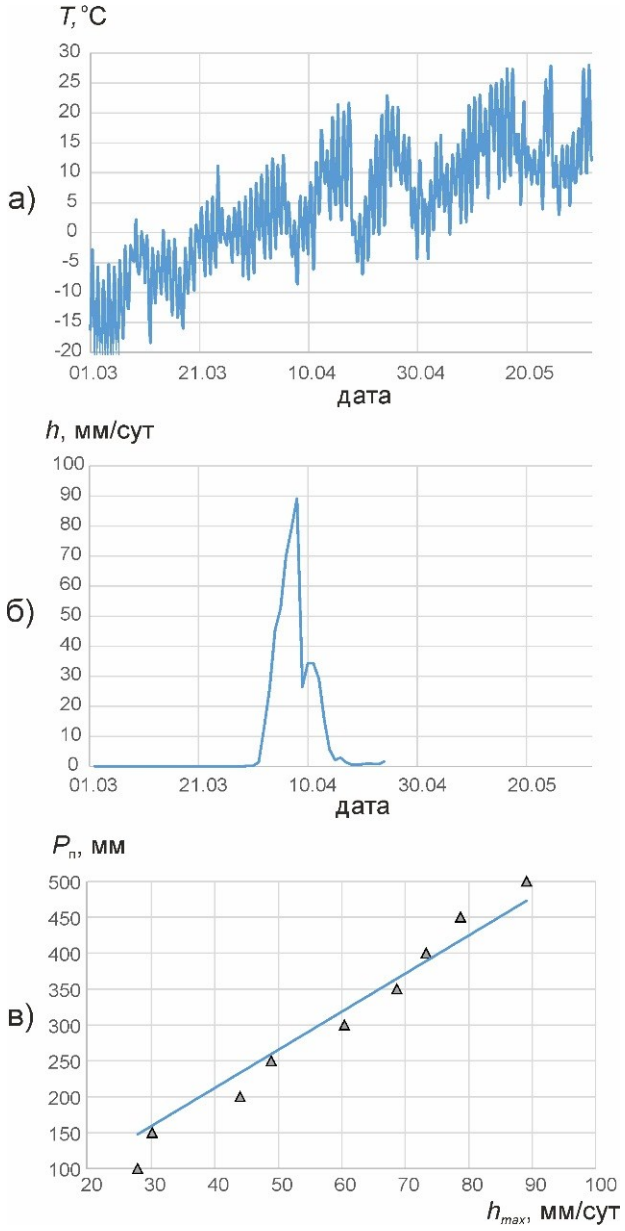


Рисунок 8. Расчеты по модели снеготаяния [Matveeva, Sidorchuk, 2020] для метеостанции Кызыл: ход температуры воздуха T для периода снеготаяния в 2008 г.(а), гидрограф суточного склонового стока h (мм) при расчетной величине запасов воды в снеге в начале снеготаяния 500 мм (б) и максимальный суточный слой стока талых вод h_{max} (мм/сут) при разных расчетных величинах запасов воды в снеге $P_п$, от 100 до 500 мм (в).

Figure 8. Calculations based on the snow thaw model [Matveeva, Sidorchuk, 2020] for the Kyzyl weather station: variation of air temperature T for the snow thaw period in 2008 (a), hydrograph of daily surface runoff h (mm) at the given value of water equivalent in snow at the beginning of snowmelt 500 mm (b), and maximum daily melt water runoff depth h_{max} (mm/day) at different given values of water equivalent in snow $P_п$, from 100 to 500 mm (c).

При таком соотношении, запасы воды в снеге перед началом снеготаяния составляли 265 мм, а объем стока палео-Дона за половодье, принимаемый близким к годовому объему стока, – 113 км^3, что в 4 раза больше современного стока. Нужно отметить, что расчеты по обобщенной эмпирической формуле давали величину 90 км^3 [Панин, Сидорчук, Власов, 2013], что укладывается в ошибку палеогидрологических расчетов около ±20 %, установленную в [Сидорчук, Панин, Борисова, 2008].

Заключение

Проведенные исследования палеорек бассейна р. Дон позволяют сделать следующие выводы.

1) Современные меандрирующие реки являются аналогами больших меандрирующих палеорусел. Доказательством (количественным) является близость (практически равенство) как функций распределения вероятностей, так и средних величин отношений шагов излучин и ширин русел для современных и древних меандрирующих русел. Дополнительные (качественные) аргументы, как-то наличие гривистой поймы, побочней, характерные поперечные профили палеорусел в области плесов и перекатов, характерное строение аллювия, были рассмотрены в [Панин, Сидорчук, 2006].

2) Для палеогидрологических реконструкций возможно использование связи между максимальным расходом воды и шириной русла (формулы 3), полученной для современных рек. Это утверждение обосновано довольно обширным эмпирическим материалом по рекам разных размеров и с самыми разными гидрологическими режимами, включая и палеореки, для которых расход воды восстанавливался гидравлическими методами. Рассчитанные максимальные расходы древних рек приводятся к критическому малому водосбору, где максимальные модули стока (максимальные суточные слои стока при снеготаянии) не зависят от площади водосбора и могут быть нанесены на карту в изолиниях.

3) Точность палеогидрологических расчетов невелика и составляет около ±20 % от среднего [Сидорчук, Панин, Борисова, 2008].

Палеогидрологические реконструкции можно считать достоверными только для территорий и периодов времени с существенными отличиями размеров палеорусел от современных русел. Это условие соблюдается для бассейна р. Дон, так как ширины палеорусел в 3–12 раз больше современных для тех же площадей водосборов.

4) Средняя по бассейну величина максимального суточного слоя стока при снеготаянии составляла для бассейна р. Дон около 50 мм/сут, что в 6 раз больше современного соответствующего показателя. Запасы воды в снеге перед началом снеготаяния составляли 265 мм, а объем стока за половодье, принимаемый близким к годовому объему стока – 113 км^3, что в 4 раза больше современного.

5) На севере и северо-западе бассейна р. Дон запасы воды в снеге перед началом снеготаяния доходили до 600 мм, суточный слой стока талых вод – до 120 мм. В центральной части бассейна запасы воды в снеге понижались до 60–160 мм, суточный слой стока талых вод – до 10–30 мм. Подобные соотношения не противоречат модельному ходу снеготаяния при ходе температур воздуха весеннего периода, характерном для современных территорий-аналогов палеоландшафтов бассейна р. Дон 18–14 тыс. лет назад.

6) Климатическая модель для бассейна р. Дон для перехода от ледниковой эпохи к современному межледниковью должна включать обильные зимние осадки, короткое и быстрое снеготаяние с максимальным стоком талых вод за сутки, достигавшим 18 % общих запасов воды в снеге.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках госбюджетной темы (ГЗ) № 121051100166-4 «Гидрология, морфодинамика и геоэкология эрозионно-русловых систем» и в рамках темы Государственного задания Института географии РАН № FMGE-2019-0005.

Acknowledgements

The studies were carried out within the framework of the State Assignment No. 121051100166-4 "Hydrology, morphodynamics and geoecology of erosion-channel systems" and within the framework of the State Assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences No. FMGE-2019-0005.

Литература

Борисова О.К. Ландшафтно-климатические условия в центральной части Восточно-Европейской равнины в последние 22 тысячи лет (реконструкция по палеоботаническим данным) // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 6. С. 664–675. DOI: 10.31857/S0321059621060031.

Великанов М.А. Русловой процесс. М.: Физматгиз, 1958. 395 с.

Величко А.А. Природный процесс в плейстоцене. М.: Наука, 1973. 256 с.

Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования *стока.* Опыт критического анализа. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 312 с.

Волков И.А. О недавнем прошлом рек Ишим и Нура // Труды лаборатории аэрометодов АН СССР. № 9. 1960. С. 59–71.

References

Borisova O.K. Landscape and climatic conditions in the central East European Plain in the last 22 thousand years: reconstruction based on paleobotanical data. *Water Resources*, 2021, vol. 48, no. 6, pp. 886–896. DOI: 10.1134/S0097807821060038 (Russ. ed.: Borisova O.K. Landshaftno-klimaticheskiye usloviya v tsentral'noy chasti Vostochno-Yevropeyskoy ravniny v posledniye 22 tysyachi let (rekonstruktsiya po paleobotanicheskim dannym). *Vodnyye resursy*, 2021, vol. 48, no. 6, pp. 664–675. DOI: 10.31857/S0321059621060031).

Davis W.M. La Seine, la Meuse et la Moselle. *Ann. De Géographie*, 1895, vol. 4, pp. 25–49.

Dokuchaev V.V. *Sposoby obrazovaniya rechnykh dolin Evropeiskoi Rossii [The ways of the river valleys formation at the European Russia]*. St. Petersburg, Tipografiya V. Dermakova, 1878. 221 p. (In Russian).

Волков И.А. Следы мощного стока в долинах рек юга Западной Сибири // Доклады АН СССР. 1963. Т. 151. № 3. С. 23–25.

Георгиевский В.Ю. Научно-прикладной справочник: Основные гидрологические характеристики водных объектов бассейна реки Дон. СПб: Свое издательство, 2020. 262 с.

Гричук В.П. Гляциальные флоры и их классификация // Последний ледниковый покров на северо-западе Европейской части СССР. М.: Наука, 1969. С. 57–70.

Гричук В.П. Растительность позднего плейстоцена // Динамика ландшафтных компонентов и внутренних морских бассейнов Северной Евразии за последние 130000 лет. Отв. ред. А.А. Величко. М.: ГЕОС, 2002. С. 64–89.

Докучаев В.В. Способы образования речных долин Европейской России. СПб: Типография В. Дермакова, 1878. 221 с.

Евстигнеев В.М. Речной сток и гидрологические расчеты. М.: Изд-во МГУ, 1990. 304 с.

Комаров В.Д. Весенний сток равнинных рек европейской части СССР, условия его формирования и методы прогнозов. М.: Гидрометеоиздат, *1959*. 296 с.

Маккавеев Н.И., Советов В.С. Трассирование землечерпательных прорезей на перекатах равнинных рек Европейской части СССР // Труды ЦНИИРФ. 1940. Вып. 3. 60 с.

Маккавеев Н.И., Хмелева Н.В, Гун Го-юань. Свободные меандры // Экспериментальная геоморфология. Вып. 2 / Под ред. Н.И. Маккавеева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1969. С. 25–62.

Матлахова Е.Ю. Макроизлучины р. Вороны как свидетельства мощного речного стока в позднеледниковье // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2021. № 2. С. 103–109.

Неваленный Ю.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Изд. 2-е. Серия Донецкая. Лист L-37-V (г. Шахты). Объяснительная записка. М., 2000. 183 с.

Dury G.H. Contribution to a general theory of meandering valleys. *Am. J. Sci.*, 1954, vol. 252, pp. 193–224.

Dury G.H. Principles of underfit streams. *US Geological Survey Professional Paper 452-A*. Washington, DC, USA: U.S. Government Printing Office, 1964. 67 p. DOI: 10.3133/pp452A.

Dury G.H. Theoretical implications of underfit streams. *US Geological Survey Professional Paper 452-C*. Washington, DC, USA: U.S. Government Printing Office, 1965. 43 p. DOI: 10.3133/pp452C.

Evstigneev V.M. *Rechnoy stok i gidrologicheskiye raschety [River flow and hydrological calculations]*. Moscow, Publ. of Moscow State University, 1990. 304 p. (In Russian).

Georgiyevskiy V.Yu. *Nauchno-prikladnoy spravochnik: Osnovnyye gidrologicheskiye kharakteristiki vodnykh ob"yektov basseyna reki Don [Scientific and Applied Handbook: Basic Hydrological Characteristics of Water Bodies of the Don River Basin]*. St. Petersburg, Publ. Svoye Izdatel'stvo, 2020. 262 p. (In Russian).

Grichuk V.P. Glyatsial'nyye flory i ikh klassifikatsiya [Glacial floras and their classification]. *Poslednii lednikovyi pokrov na severo-zapade Evropeiskoi chasti SSSR [The last glacial period in northwestern European Russia]*. Moscow, Nauka Publ., 1969, pp. 57–70. (In Russian).

Grichuk V.P. Rastitel'nost' pozdnego pleystotsena [Vegetation of the late Pleistocene]. *Dinamika landshaftnykh komponentov i vnutrennikh morskikh basseynov Severnoy Yevrazii za posledniye 130000 let [Dynamics of landscape components and internal marine basins of Northern Eurasia over the past 130,000 years]*. A.A. Velichko (ed.). Moscow, Publ. GEOS, 2002, pp. 64–89 (In Russian).

Inglis C.C. Meanders and their bearing on river training. *Inst. Civ. Eng. Mar. Waterways Eng. Div.*, 1947, vol. 7, pp. 3–54.

Khrutsky S.V., Smolyaninov V.M., Kostsova E.V. *Al'bom geologicheskikh razrezov tsentral'no-chernozemnykh oblastey [Album of geological sections of the Central Chernozem regions]*. Voronezh, Izdatel'stvo VGU, 1974. 176 p. (In Russian).

Панин А.В., Сидорчук А.Ю. Макроизлучины ("большие меандры"): проблемы происхождения и интерпретации // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2006. № 6. С. 14–22.

Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Власов М.В. Мощный поздневалдайский речной сток в бассейне Дона // Известия РАН. Серия географическая. 2013. № 1. С. 118–129.

Протасьев М.С. (ред.) Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 7. Донской район. Л.: Гидрометиоздат, 1973. 460 с.

Рычагов Г.И. Макроизлучины в долинах рек: геоморфологический феномен // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2003. № 5. С. 22–28.

Сидорчук А.Ю. Морфология грядового рельефа речных русел // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 1. С. 33–45. DOI: 10.31857/S0321059620010137.

Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К. Геоморфологические подходы к оценке величины речного стока в геологическом прошлом (ст. 5. Сравнительный анализ результатов, полученных разными методами) // Геоморфология. 2019. № 1. С. 66–79.

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. DOI: 10.31857/S0321059621060171.

Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К. Речной сток на Восточно-Европейской равнине за последние 20 тысяч лет и проблема изменения уровней южных морей // Вопросы географии. Сб. 145. Гидрологические изменения. М.: Издательский дом «Кодекс», 2018. С. 144–168.

Сидорчук А.Ю., Украинцев В.Ю., Панин А.В. Оценка годового стока Волги в позднеледниковье по данным о размерах палеорусел // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 6. С. 643–655. DOI: 10.31857/s0321059621060171.

Хруцкий С.В., Смольянинов В.М., Косцова Э.В. Альбом геологических разрезов центрально-

Komarov V.D. *Vesenniy stok ravninnykh rek yevropeyskoy chasti SSSR, usloviya yego formirovaniya i metody prognozov [Spring runoff of lowland rivers in the European part of the USSR, conditions for its formation and methods of forecasting]*. Moscow, Publ. Gidrometeoizdat, 1959. 296 p. (In Russian).

Makkaveev N.I., Khmeleva N.V., Gong Guo-yuan. Svobodnyye meandry [Free meanders] // *Eksperimental'naya geomorfologiya. Vypusk 2 [Experimental geomorphology. Issue 2]*. Makkaveev N.I. [Ed.]. Moscow, Publ. of Moscow State University, 1969, pp. 25–62. (In Russian).

Makkaveev N.I., Sovetov V.S. Trassirovaniye zemlecherpatel'nykh prorezey na perekatakh ravninnykh rek Yevropeyskoy chasti SSSR [Designing dredging passages on the riffles of the rivers in the plains of the European part of the USSR]. *Trudy TsNIIRF [Proceedings of TsNIIRF]*, 1940, iss. 3. 60 p. (In Russian).

Matlakhova E.Yu. Makroizluchiny reki Vorony kak svidetel'stva moshchnogo rechnogo stoka v pozdnelednikov'ye [Macrobends of the Vorona River as evidence of powerful river runoff in the Late Glacial]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*, 2021, no. 2, pp. 103–109. (In Russian).

Matveeva T., Sidorchuk A. Modelling of surface runoff on the Yamal peninsula, Russia, using era5 reanalysis. *Water*, 2020, vol. 12, no. 8. P. 2099. DOI: 10.3390/w12082099.

Nevalenny Yu.V. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:200000. Izd. 2-ye. Seriya Donetskaya. List L-37-V (g. Shakhty) Ob"yasnitel'naya zapiska. [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200000. 2nd edition. Series Donetsk. Sheet L-37-V (Mine). Explanatory text]*. Moscow, 2000. 183 p. (In Russian).

Panin A.V., Sidorchuk A.Yu. Makroizluchiny ("bol'shiye meandry"): problemy proiskhozhdeniya i interpretatsii [Macrobends ("large meanders"): problems of origin and interpretation]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya,* 2006, no. 6, pp. 14–22. (In Russian).

Panin A.V., Sidorchuk A.Yu., Vlasov M.V. Moshchnyy pozdnevaldayskiy rechnoy stok v basseyne Dona [Powerful Late Valdai river runoff in

черноземных областей. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1974. 176 с.

Davis W.M. La Seine, la Meuse et la Moselle // Ann. de Géographie. 1895. Vol. 4. P. 25–49.

Dury G.H. Contribution to a general theory of meandering valleys // Am. J. Sci. 1954. Vol. 252. P. 193–224.

Dury G.H. Principles of underfit streams // US Geological Survey Professional Paper 452-A. Washington, DC, USA: U.S. Government Printing Office, 1964. 67 p. DOI: 0.3133/pp452A

Dury G.H. Theoretical implications of underfit streams // US Geological Survey Professional Paper 452-C. Washington, DC, USA: U.S. Government Printing Office, 1965. 43 p. DOI: 10.3133/pp452C

Inglis C.C. Meanders and their bearing on river training // Inst. Civ. Eng. Mar. Waterways Eng. Div. 1947. Vol. 7. P. 3–54.

Matveeva T., Sidorchuk A. Modelling of surface runoff on the Yamal peninsula, Russia, using era5 reanalysis // *Water*. 2020. Vol. 12, no. 8. P. 2099. DOI: 10.3390/w12082099

Popov D., Marković S.B., Štrbac D. Generations of meanders in Serbian part of Tisa valley // Journal of the Geographical Institute "Jovan Cvijic", SASA. 2008. Vol. 58. P. 29–41. DOI: 10.2298/IJGI0858029P

Rotnicki K. Retrodiction of palaeodischarges of meandering and sinuous rivers and its palaeoclimatic implications // Temperate palaeohydrology. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 1991. P. 431–470.

Schumm S.A. Quaternary paleohydrology // The Quaternary of the United States / Wright H.E., Jr, Frey D.G. (Eds.). Princeton, NY, USA: Princeton University Press, 1965. P. 783–794.

Schumm S.A. River adjustment to altered hydrologic regimen – Murrumbidgee River and paleochannels // US Geological Survey Professional Paper 598. Washington, DC, USA: U.S. Government Printing Office, 1968. 65 p. DOI: 10.3133/pp598.

Sidorchuk A. The large rivers of the past in West Siberia: Unknown hydrological regimen // *Water*.

the Don basin]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2013, no. 1, pp. 118–129. (In Russian).

Popov D., Marković S.B., Štrbac D. Generations of meanders in Serbian part of Tisa valley. *Journal of the Geographical Institute "Jovan Cvijic", SASA,* 2008, iss. 58, pp. 29–41. DOI: 10.2298/IJGI0858029P.

Protasiev M.S. (ed.). *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Tom 7. Donskoy rayon [Resources of surface waters of the USSR. Vol. 7. Donskoy region]*. Leningrad, Publ. Gidrometiozdat, 1973. 460 p. (In Russian).

Rotnicki K. Retrodiction of palaeodischarges of meandering and sinuous rivers and its palaeoclimatic implications. *Temperate palaeohydrology*. Chichester, UK, John Wiley and Sons, 1991, pp. 431–470.

Rychagov G.I. Makroizluchiny v dolinakh rek: geomorfologicheskiy fenomen [Macrobends in river valleys: a geomorphological phenomenon]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*, 2003, no. 5. (In Russian).

Schumm S.A. Quaternary paleohydrology. *The Quaternary of the United States.* Wright H.E., Jr, Frey D.G. (eds.). Princeton, NY, USA, Princeton University Press, 1965, pp. 783–794.

Schumm S.A. River adjustment to altered hydrologic regimen – Murrumbidgee River and paleochannels. *US Geological Survey Professional Paper 598*. Washington, DC, USA, U.S. Government Printing Office, 1968, 65 p. DOI: 10.3133/pp598.

Sidorchuk A. The large rivers of the past in West Siberia: Unknown hydrological regimen. *Water*, 2023, vol. 15, no. 2, pp. 258. DOI: 10.3390/w15020258.

Sidorchuk A.Yu. Morfologiya gryadovogo rel'yefa rechnykh rusel [Morphology of dune-like relief in rivers]. *Water Resources*, 2020, vol. 47, no. 1, pp. 65–76. DOI: 10.1134/S0097807820010133 (Russ. ed.: Sidorchuk A.Yu.. *Vodnyye resursy*, 2020, vol. 47, no. 1, pp. 33–45. DOI: 10.31857/S0321059620010137).

Sidorchuk A.Yu., Borisova O.K. Method of paleogeographical analogues in paleohydrological reconstructions. *Quaternary International*, 2000, vol. 72, no. 1, pp. 95–106. DOI: 10.1016/S1040-6182(00)00025-2.

2023. Vol. 15, no. 2. P. 258. DOI: 10.3390/w15020258.

Sidorchuk A.Yu., Borisova O.K. Method of paleogeographical analogues in paleohydrological reconstructions. Quaternary International. Vol. 72, no 1. 2000. P. 95–106. DOI: 10.1016/S1040-6182(00)00025-2.

Vandenberghe J., Sidorchuk A. Large palaeomeanders in Europe: Distribution, formation process, age, environments and significance // Palaeohydrology. Geography of the physical environment. Cham, Switzerland: Springer, 2019. P. 169–186.

Ye B., Yang D., Zhang Z., Kane D.L. Variation of hydrological regime with permafrost coverage over Lena Basin in Siberia // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114(D7). DOI: 10.1029/2008JD010537.

Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Borisova O.K. Climate-induced changes in surface runoff on the North-Eurasian plains during the Late Glacial and Holocene. *Water Resources*, 2008, vol. 35, no. 4, pp. 386-396. DOI: 10.1134/S0097807808040027 (Russ. ed.: Klimaticheski obuslovlennyye izmeneniya rechnogo stoka na ravninakh severnoy Yevrazii v pozdnelednikov'ye i golotsene. *Vodnyye Resursy*, 2008, vol. 35, no. 4, pp. 406-416. DOI: 10.31857/S0321059621060171).

Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Borisova O.K. Geomorfologicheskiye podkhody k otsenke velichiny rechnogo stoka v geologicheskom proshlom. Statya 5. Sravnitel'nyi analiz rezul'tatov, poluchennykh raznymi metodami [Geomorphological approaches to assessing the value of river flow in the geological past. Paper 5. Comparative analysis of the results obtained by different methods]. *Geomorfologiya*, 2019, no. 1, pp. 66–79. (In Russian).

Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Borisova O.K. Rechnoy stok na Vostochno-Yevropeyskoy ravnine za posledniye 20 tysyach let i problema izmeneniya urovney yuzhnykh morey [River runoff in the East European Plain over the past 20 thousand years and the problem of changes in the levels of the southern seas]. *Voprosy geografii. Sbornik 145. Gidrologicheskiye izmeneniya [Problems of Geography. Volume 145. Hydrological changes]*. Moscow, Codex Publishing House, 2018, pp. 144–168. (In Russian).

Sidorchuk A.Yu., Ukraintsev V.Yu., Panin A.V. Estimating annual Volga runoff in the Late Glacial epoch from the size of river paleochannels. Water Resources, 2021, vol. 48, no. 6, pp. 864-876. DOI: 10.1134/S0097807821060178 (Russ. ed.: Otsenka godovogo stoka Volgi v pozdnelednikov'ye po dannym o razmerakh paleorusel. *Vodnyye resursy*, 2021, vol. 48, no. 6, pp. 643–655. DOI: 10.31857/s0321059621060171).

Vandenberghe J., Sidorchuk A. Large palaeomeanders in Europe: Distribution, formation process, age, environments and significance. *Palaeohydrology. Geography of the physical environment*. Cham, Switzerland, Springer, 2019, pp. 169–186.

Velichko A.A. *Prirodnyi protsess v pleystotsene [Natural Process in the Pleistocene]*. Moscow, Publ. Nauka, 1973. 256 p. (In Russian).

Velikanov M.A. *Ruslovoy protsess [Channel process]*. Moscow, Publ. Fizmatgiz, 1958. 395 p. (In Russian).

Vinogradov Yu.B. *Matematicheskoye modelirovaniye protsessov formirovaniya stoka. Opyt kriticheskogo analiza [Mathematical modeling of runoff formation processes. The experience of critical analysis]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1988, 312 p. (In Russian).

Volkov I.A. O nedavnem proshlom rek Ishima i Nury [On the recent past of the rivers Ishim and Nura]. *Trudy Laboratorii Aerometodov AN SSSR*, 1960, no. 9, pp. 15–19. (In Russian).

Volkov I.A. Remnants of powerful flow in the valleys of the southern West Siberia [Sledy moschnogo stoka v dolinakh rek yuga Zapadnoy Sibiri]. *Doklady AN SSSR*, 1963, vol. 151, pp. 23–25. (In Russian).

Ye B., Yang D., Zhang Z., Kane D.L. Variation of hydrological regime with permafrost coverage over Lena Basin in Siberia. *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114(D7). DOI: 10.1029/2008JD010537.