

УДК 551.8, 556.535, 556.537

## МОРФОЛОГИЯ РУСЕЛ И ВОДНЫЙ РЕЖИМ БОЛЬШИХ РЕК РАВНИН СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ 14–18 ТЫСЯЧ ЛЕТ НАЗАД

А.Ю. Сидорчук<sup>1\*</sup>, О.К. Борисова<sup>2</sup>, А.В. Панин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

<sup>2</sup>Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия

\**fluvial05@gmail.com*

Поступила в редакцию 25.10.2025

После доработки 17.12.2025

Принята к публикации 18.12.2025

**Аннотация.** В конце плейстоцена — первой половине позднеледниковья, примерно 14–18 тыс. лет назад, русла рек равнин Северной Евразии были до 10–15 раз больше русел современных рек в тех же бассейнах. Фрагменты этих больших меандрирующих палеорусел широко распространены в поймах рек и на низких террасах. Гидрологический режим этих рек представляет большой интерес с точки зрения палеоклиматологии. Морфометрические характеристики больших палеорусел — ширина палеорула, длина волны меандра — измерены на топографических картах и космических изображениях. Построены морфометрические связи ширины современных русел со среднемаксимальными расходами воды. Эти связи использованы для реконструкции максимальных расходов во время половодья для рек бассейнов Днепра, Дона, Волги и рек Западной Сибири. Суточный слой стока на максимуме половодья, который соответствует максимальному слою суточного таяния снега в период снеготаяния, приведен к единичным речным бассейнам площадью <math><1000\text{ км}^2</math>. Среднее значение для южного мегасклона Восточно-Европейской равнины составило 51 мм/сутки, что в 6 раз больше современного значения, в том числе 50.6 мм/сутки для бассейна р. Волги (в 6 раз), 50.7 мм/сутки (в 7 раз) для бассейна р. Дон и 48 мм/сутки (в 10 раз больше современного) для бассейна р. Днепр. Для рек севера Западно-Сибирской низменности средний максимальный слой суточного стока составлял 64 мм (в 2.5 раза больше современного) и для бассейна р. Оби 54 мм (в 8 раз больше современного). Для пересчета этих величин максимального стока в среднегодовые применена палеогидрологическая аналогия. На основании палеофлористического метода и по данным математического моделирования климата определялись современные территории — аналоги для климатических условий позднего плейстоцена — позднеледниковья. Результаты расчетов показали, что на южном мегасклоне Восточно-Европейской равнины и на Западно-Сибирской низменности на площади 5.52 млн км<sup>2</sup> средние запасы воды в снеге перед началом снеготаяния составляли 309–390 мм, а объем стока за половодье с этой территории, принимаемый близким к годовому объему стока, — 1706–2150 км<sup>3</sup>, что в 2.1–2.7 раза больше современного. Полученные результаты противоречат устоявшимся представлениям, основанным на ксерофильном облике растительности, о том, что перигляциальный климат на равнинах Северной Евразии в целом был сухим. Результаты палеогидрологических реконструкций показали, что в условиях перигляциального климата существовала резкая сезонность внутригодового распределения осадков: атмосферные осадки в виде снега поступали на поверхность речных водосборов во время продолжительной зимы, весеннее снеготаяние было непродолжительным и интенсивным, половодье — коротким с высоким максимумом, а летом осадков было мало, и сток вод межени из толщи вечномерзлых грунтов был незначительным, что и приводило к ксерофитизации растительности.

**Ключевые слова:** большие меандрирующие реки; поздний плейстоцен; позднеледниковье; морфометрические связи; палеогеографическая аналогия; модели циркуляции атмосферы и океана; максимальный суточный слой стока; среднегодовой сток

DOI: <https://doi.org/10.71367/3034-4638-2025-4-4-58-98>

## ВВЕДЕНИЕ

Гидрологические события прошлого оставляют следы в русловом рельефе и аллювиальных отложениях древних рек. Расшифровка этих следов дает информацию для понимания гидрологических процессов и климата прошлого, их отличий от современных. Одним из наиболее ярких феноменов такого рода являются палеорула больших размеров, которые свидетельствуют о значительной водоносности древних рек.

В.В. Докучаев (1878), изучая происхождение речных долин Европейской России, привел примеры отношения ширины пойм рек бассейна Днепра к ширине их русел (до 375 для малых рек), совершенно чрезмерного для прохождения вод половодья. Докучаев объяснял это явление наличием в речных долинах реликтовых цепочек озерных котловин. Н.И. Маккавеев (1955) возражал против универсальности гипотезы Докучаева, объясняя расширение днищ речных долин воздействием речных же факторов — блужданием русел рек по днищу. В середине XX в. 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 соавт. (Маккавеев и др., 1969) стало ясно, что несоответствие ширины пойм и низких террас ширине русел (*underfit channels*) относится только к современным руслам. На поймах и низких террасах рек этими исследователями были обнаружены следы древних меандрирующих русел в виде вееров блуждания и/или староречий с размерами ширины русел и шага излучин, превышающими соответствующие морфометрические характеристики современных русел более чем в 10 раз. Именно этим палеорулам соответствует ширина большинства речных пойм, унаследованных от времени активности больших палеорусел (Panin et al., 1999; Сидорчук, 2014). Ширина пояса меандрирования больших рек в целом близка к ширине современных пойм, что позволяет говорить об их формировании именно большими древними реками.

Выяснилось, что это явление хорошо выражено в северном полушарии от зоны тундры до сухих степей и имеет циркумполярное распространение (Сидорчук, 2003). Большие палеорула описаны на Западно-Сибирской низменности (ЗСН) (Волков, 1963), на Восточно-Европейской равнине (ВЕР) (Панин и др., 1992; Сидорчук и др., 2000), в Западной Европе (Kozarski and Rotnicki, 1977; Starkel, 1995; Starkel et al., 1996; Borsy, Felegyhazi, 1983; Howard et al., 2004; Gábris, Nádor, 2007;

Vandenberghе, Sidorchuk, 2019) и в Северной Америке (Dury, 1965), а также в южном полушарии на равнинах Австралии (Page et al., 1996).

Наибольшее количество хорошо сохранившихся фрагментов больших палеорусел обнаруживается во внеледниковой области на ВЕР и ЗСН. Так, Н.И. Маккавеев с коллегами (1969) описали большие палеорула в бассейне р. Орели (приток Днепра). И.А. Волков (1960) обнаружил в бассейнах Ишима и Нуры ясные следы древних больших рек, ширина которых намного превышала ширину современных русел рек в тех же бассейнах. В последующих публикациях И.А. Волков (1963) показал, что это явление характерно для всего юга ЗСН, и предположил, что большие палеорула являются свидетельствами эпох повышенной увлажненности и больших расходов воды в этих реках. Полученные датировки (Зыкина и др., 1981) показали, что большие реки были активны не менее 15 тысяч лет назад (тыс. л. н.), в период начала деградации последнего материкового оледенения, но все еще широкого распространения вечной мерзлоты. Их формирование было обусловлено специфическими климатическими условиями в конце последней ледниковой эпохи и соответствующим гидрологическим режимом.

Значительная информация, накопленная в продолжение всех этих классических работ, позволяет поставить целью настоящей статьи реконструкцию максимального и среднегодового стока воды на южном мегасклоне ВЕР (в бассейнах Днепра, Дона и Волги), в бассейнах Оби и рек севера ЗСН в период формирования больших меандрирующих рек. Для этого необходимо решить следующие задачи: 1) обобщить весь накопленный материал по распространению и морфометрии больших меандрирующих палеорек на этой территории; 2) описать методологию восстановления гидрологического режима этих рек, в том числе нового подхода к способу расчета среднегодового стока палеорек, основанного на использовании данных моделирования температуры воздуха для периода деградации оледенения с помощью моделей глобальной циркуляции атмосферы и океана и моделирования стока в период снеготаяния с помощью гидрологической модели; 3) рассмотреть результаты такой реконструкции и дать оценку степени вариации полученных палеогидрологических характеристик; 4) обсудить соответствие этих характеристик современным воззрениям на климат позднего плейстоцена и позднеледниковья.

## МАТЕРИАЛЫ

### *Общие сведения о территории исследований*

Территория исследований занимает южный мегасклон ВЕР и всю ЗСН — т. е. основные равнинные территории Северной Евразии, на которых выявлены следы больших древних меандрирующих палеорусел, достаточно изученных для палеогидрологических реконструкций.

Южный мегасклон ВЕР занимает территорию от восточного подножия Карпатских гор (Приднепровская возвышенность) до западного подножия Уральских гор и относится к бассейнам Черного и Каспийского морей. Истоки всех основных рек расположены на главном водоразделе, включающем (с запада на восток) цепочку возвышенностей с высотами более 180 м над уровнем моря (н. у. м.) — Волковысскую, Минскую, Витебско-Невельскую, Валдайскую, Вепсовскую, Андомскую, Грязовецко-Даниловскую возвышенности и Северные Увалы (Былинский, Востоков, 1976). Эту территорию дренируют крупнейшие европейские реки: Днепр с площадью бассейна 504 000 км<sup>2</sup>, Дон с площадью 422 000 км<sup>2</sup> и Волга с площадью 1 360 000 км<sup>2</sup>. Среднерусская возвышенность разделяет бассейны Днепра и верхней Волги—Дона, а Приволжская возвышенность — бассейны Дона и Волги. Средняя температура воздуха в июле повышается с севера на юг с 17 до 24 °С, а в январе — с северо-востока на юго-запад равнины от –18 до –6 °С. Годовое количество осадков уменьшается от 600–750 мм вблизи главного водораздела ВЕР до <250 мм на ее юго-восточной окраине. Северную часть этой территории занимает зона тайги, южнее расположены зона широколиственных лесов, лесостепь и степь.

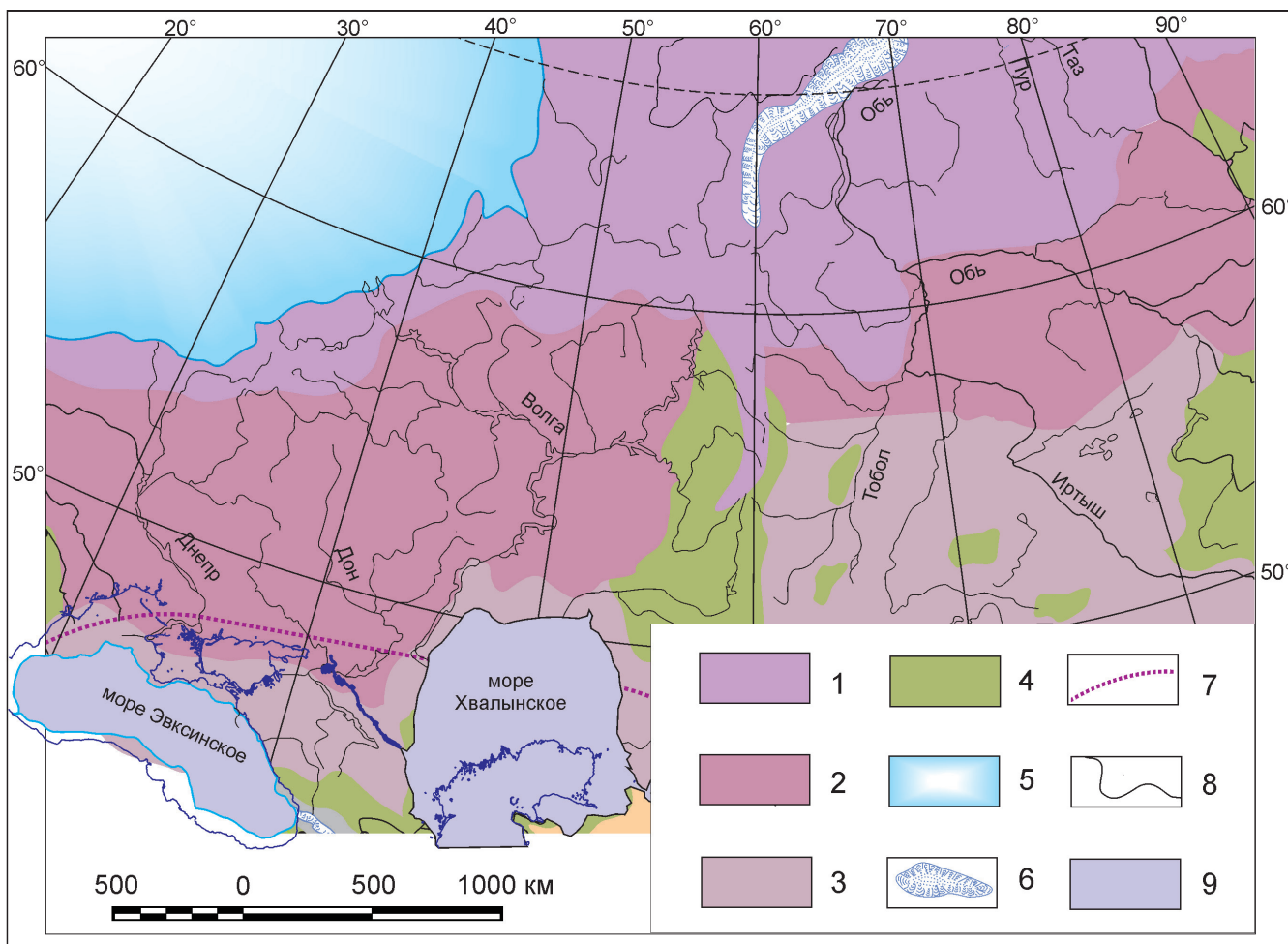
ЗСН площадью более 3.5 млн км<sup>2</sup> граничит на западе с Уральскими горами, на востоке — со Среднесибирским плоскогорьем и Енисейским краем. На севере ЗСН ограничена побережьем Карского моря, на юге с ней соседствуют Казахский мелкосопочник, Алтай и Саяны. Низменность разделена на две части невысокой субшироко-вытянутой возвышенностью — Сибирскими Увалами, достигающими отметок 120–240 м н. у. м. К югу от Сибирских Увалов расположены внутренние котловины с отметками менее 100 м н. у. м., а к северу, к побережью Карского моря, спускаются приморские низменности. ЗСН дренируется р. Обью с притоками (площадь водосбора 2 972 000 км<sup>2</sup>), а также р. Таз (площадь водосбора 150 000 км<sup>2</sup>), Пур (площадь водосбора 112 000 км<sup>2</sup>) и другими, впадающими в Обскую губу. Средняя температура воздуха в июле увеличивается с севера на юг с 5 до 20 °С, в январе — с северо-востока на юго-запад

равнины от –26 до –18 °С. Годовое количество осадков составляет около 500–600 мм на Сибирских Увалах, уменьшаясь до 300 мм как к северу, так и к югу. Северную часть равнины занимают тундра и редколесье со сплошной вечной мерзлотой, среднюю — бореальные леса (тайга), частично с прерывистой мерзлотой, южную часть равнины занимают лесостепь и степь.

Палеоландшафты равнин Северной Евразии (рис. 1) восстановлены по данным спорово-пыльцевого анализа для периода, близкого к максимуму последнего материкового оледенения (Гричук, 2002). Скандинавский ледниковый щит заходил на южный мегасклон ВЕР, в верховья Днепра и Волги, во время максимума оледенения, и в начале дегляциации в эти реки поступали воды тающего ледника. По наиболее вероятным оценкам, сток талых вод в верховьях Днепра составлял от 68 км<sup>3</sup>/год на начальных стадиях дегляциации и 26 км<sup>3</sup>/год перед тем, как южная граница материковых льдов сместилась к северу от главного водораздела равнины (Sidorchuk et al., 2011), а в верховьях Волги — 15 км<sup>3</sup>/год (Панин и др., 2021). Однако 18 тыс. л. н. край ледника уже располагался севернее главного водораздела, и сток талых вод направлялся на запад и северо-восток. Кроме того, талые ледниковые воды могли производить изменения морфологии русел только главных рек (Березины, Днепра и Волги), но не их притоков. В бассейн Дона воды с тающего ледника вообще не могли попасть.

В позднем пленигляциале северные части бассейнов Днепра и Волги занимали перигляциально-тундровые сообщества с холодоустойчивыми ксерофитными группировками; южнее вплоть до верховьев р. Дон реконструирована перигляциально-степная растительность с участками березовых, сосновых и лиственных редколесий, с тундровыми и галофитными сообществами; еще южнее — разнотравно-злаковая степь. На этих территориях была распространена вечная мерзлота, южная граница которой с температурой грунтов ниже –3 °С проходила примерно по параллели 50° с. ш. В низовьях всех рек южного макросклона ВЕР и на осушенном шельфе Азовского и Черного морей вне области вечной мерзлоты существовали злаковые, злаково-разнотравные и полынные степи.

На ЗСН в период дегляциации по главному руслу Оби, вероятно, проходили так называемые суперпаводки, возникавшие за счет вод тающих ледников Алтая (Зольников и др., 2024), однако, как и на ВЕР, эти паводки могли производить изменения в морфологии только основного русла Оби, но не ее притоков и не рек севера равнины.



**Рис. 1.** Основные типы растительности на равнинах Северной Евразии в позднем плейстигене. 1 – перигляциальная тундра, на юге – в сочетании с участками сосновых, березовых, лиственничных и еловых редколесий; 2 – перигляциальная лесостепь; 3 – разнотравно-злаковая и полынная степь; 4 – бореальные леса; 5 – Скандинавский ледниковый щит около 20 тыс. л. н.; 6 – горные ледники; 7 – южная граница сплошной вечной мерзлоты; 8 – речная сеть; 9 – моря. Адаптировано из (Гричук, 2002), упрощено, с дополнениями

**Fig. 1.** The main vegetation types on the plains of Northern Eurasia in the Late Pleniglacial. 1 – periglacial tundra, in the south with patches of pine, birch, larch and spruce woodlands; 2 – periglacial forest steppe; 3 – herb-grass and sedgebrush steppe; 4 – boreal forests; 5 – Scandinavian ice sheet at about 20 ka BP; 6 – mountain glaciers; 7 – southern boundary of continuous permafrost; 8 – river net; 9 – seas. Adapted from (Grichuk, 2002), simplified, with additions

В позднем плейстигене на осушенном шельфе и на севере полуострова Ямал были распространены арктические пустыни в сочетании с группировками галофитов и травяно-моховые тундры (Гричук, 2002). В низовьях Оби, в бассейнах Надыма, Пура и Таза реконструированы мохово-кустарничковые тундры с участием березового и елового редколесья. Южнее, до устья Иртыша и верховьев Пура, преобладало березовое и еловое редколесье. В низовьях Иртыша и его притоков были распространены перигляциальные луговые степи с еловыми и березовыми лесами с участием тундровых ассоциаций, а в бассейне средней Оби с притоками – в соче-

тании с кедрово-сосновыми и березовыми лесами (Гричук, 2002). На юге и юго-западе ЗСН, вплоть до Казахского мелкосопочника и предгорий Алтая, были распространены полынно-разнотравные, полынно-злаковые и полынно-солянковые степи. По верхней Оби и ее притокам существовали участки остепненных березовых и сосновых лесов. Южная граница вечной мерзлоты с температурой грунтов ниже  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  проходила примерно по параллели  $50^{\circ}$  с. ш., т. е. грунты на всей территории ЗСН находились в мерзлом состоянии.

Эту обширную территорию дренировали большие многоводные реки.

### Морфометрия больших палеорусел

Фрагменты больших меандрирующих палеорусел выявлялись просмотром русел, пойм и низких террас рек на крупномасштабных топографических картах, аэрофотоснимках и особенно на космических изображениях по длине сетей постоянных (речных) водотоков. Главным критерием были большие относительные размеры палеорусел: их ширина и шаг излучин в среднем на участке речного русла должны были быть не менее чем в 2–3 раза больше этих же морфометрических характеристик современного русла.

Палеорусла или представляют собой большие староречья на низких террасах и поймах (рис. 2А), или они наследуются современными руслами (рис. 2Б), или представлены хорошо выраженными гривами на пойме (рис. 2В). Основные типы соотношения древних и современных русел, выделенные по их морфологии, приведены в табл. 1. В первую очередь исследовались древние староречья, обычно один-два сопряженных изгиба, реже несколько (до 10). В староречьях измерялись шаг излучин и ширина палеорусла. Исследование больших систем

**Таблица 1.** Основные типы соотношения древних и современных русел

**Table 1.** Main types of relationship between ancient and modern channels

Индекс	Тип соотношения
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 меандрами с широкой древней поймой с макроизлучинами
E1	Река с современными меандрами с широкой древней поймой с макроизлучинами
E2	Река с пойменной многорукавностью с широкой древней поймой с макроизлучинами
F	Река с современными меандрами или пойменная многорукавность на широкой пойме с гривами большого древнего русла

древних изогнутых грив на пойме дает меньшие возможности для морфометрического анализа: здесь мог быть измерен только шаг излучин палеорусла, при наличии отчетливо идентифицируемых областей смены знака кривизны грив.

Для хорошо сохранившихся фрагментов больших меандрирующих палеорусел измерялись морфометрические характеристики – ширина русла и шаг излучин. Точность таких измерений была оценена в работе (Сидорчук и др., 2008). Если палеорусло заполнено наносами по самые бровки, то измеряемая ширина близка к ширине русла при уровне руслозаполнения. Это довольно частый, но не единственный вариант, поэтому для уменьшения ошибки измерения ширина русла определяется на относительно прямолинейных участках или на излучинах в областях смены кривизны. На таких участках крутизна обоих пойменных яров велика, и ширина русла мало меняется с изменением уровня заполнения. Тем не менее при дешифрировании границ палеорусла ошибка достигает 10% (Сидорчук и др., 2008).

Значительная ошибка возникает из-за малого количества измерений. Даже на бесприточном участке ширина русла изменяется по длине реки. Так, для меандрирующего русла р. Яны на малоприточном участке от слияния рек Сартанг и Дулгаллах до устья р. Адычи (873.5–627 км от устья) коэффициент вариации ширины русла в бровках на перегибах излучин по 97 измерениям (рис. 3) составляет около 20% ( $C_v = 0.205$ ).

Относительная ошибка оценки средней ширины русла составит

$$E_{wm} = C_v / \sqrt{N_w}. \quad (1)$$

Обычно ширину можно измерить на 1–5 участках палеорусла ( $N_w = 1–5$ ), и ошибка среднего составит 10–20%.

Шаг излучин  $\lambda$  палеорусла (расстояние по прямой между соседними точками смены знака кривизны оси русла) измеряется с большей точностью, чем ширина, так как точки смены знака кривизны русла определяются более уверенно, чем бровки русла. Кроме того, шаг излучин измеряется по рисунку грив на пойме, даже когда ширину палеорусла определить невозможно. Однако величина ошибки среднего для шага излучин больше, чем для ширины, из-за большей вариабельности шага излучин даже на бесприточном участке. Так, на уже рассмотренном отрезке русла р. Яны для 95 излучин коэффициент вариации  $C_v$  составил 0.65. Кроме того, функция распределения вероятностей длины шага излучин резко асимметричная, что делает невозможным



**Рис. 2.** Примеры крупных меандрирующих палеорусел:

А – палеорусла на пойме – р. Орель (бассейн р. Днепр; изображение этого палеорусла было опубликовано в (Маккавеев и др., 1969));

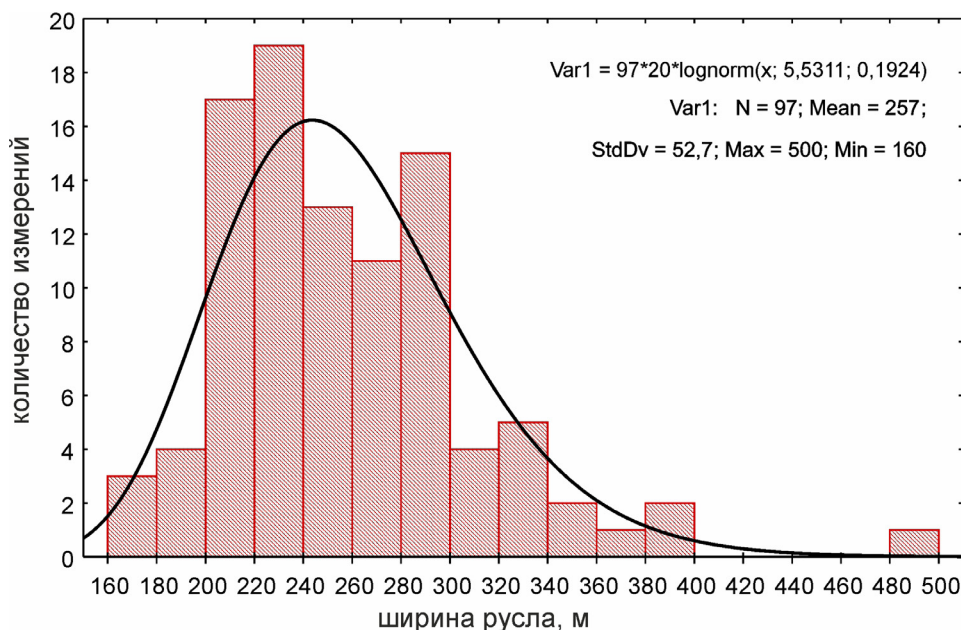
Б – современное русло наследует палеомеандры – р. Битюг (бассейн р. Дон);

В – большие гривы на пойме – р. Иж (бассейн р. Волги)

**Fig. 2.** Examples of large meandering paleochannels:

A – the modern channel inherits paleomeanders – the Bityug River (Don River basin);

B – large natural levees on the floodplain – the Izh River (Volga River basin)



**Рис. 3.** Гистограмма ширины меандрирующего русла р. Яны на участке от узла слияния рек Сартанг и Дулгаллах до устья р. Адыча

**Fig. 3.** Histogram of the width of the meandering channel of the Yana River in the section from the confluence of the Sartang and Dulgallah rivers to the mouth of the Adycha River

применение в прямом виде формулы (1) для оценки ошибки среднего.

Шаг излучин определяется шириной русла (Leopold and Wolman, 1960):

$$\lambda = k_{\lambda} W, \quad (2)$$

что дает возможность при отсутствии или малой достоверности измерений ширины палеорусел рассчитать эффективную среднюю ширину палеорусла в бровках по формуле:

$$W_m^* = \frac{W_m + \lambda_m / k_{\lambda}}{2}. \quad (3)$$

Существует большое количество фрагментов палеорусел разного вида, а также большие цирки у тылового шва поймы, которые свидетельствуют о существовании большой реки, но не дают возможности проводить морфометрический анализ. Так, В.Ю. Украинцев (2023) выделил в бассейне р. Волги более 1700 остатков больших палеорусел, но морфометрический анализ удалось выполнить только для 123 хорошо сохранившихся фрагментов. В бассейне р. Дон таких подходящих для анализа фрагментов выявлено 129, в бассейне Днепра – 210, в бассейне Оби – 35, в других бассейнах – 30.

Отношение шага излучин  $\lambda$  к ширине русла при уровне руслонаполнения  $W$  (см. формулу (2))  $k_{\lambda}$  является важной морфометрической характеристикой речных излучин. Например, величина  $k_{\lambda} > 20$  может служить признаком негидравлического

происхождения такой излучины речного русла и невозможности использования ее морфометрии для палеогидрологических построений.

Для современных рек среднее по бассейнам значение  $k_{\lambda}$  варьирует в диапазоне 5.0–6.8 (табл. 2); распределение величин, полученных для отдельных участков рек, асимметричное, хорошо аппроксимируется гамма-распределением (рис. 4а). Для палеоизлучин среднее по бассейнам  $k_{\lambda}$  варьирует в диапазоне 5.7–8.0, распределение величин также близкое к гамма-распределению (рис. 4б). Различия средних и квадратичных отклонений функций распределения незначительные. Отсюда следует вывод, что морфология излучин палеорусел в бассейнах Днепра, Дона, Волги и рек ЗСН не отличается от морфологии современных излучин и может быть использована для палеогидрологических реконструкций.

Палеогидрологические реконструкции проведены в этой работе на основе морфометрии однорукавных меандрирующих палеорек, так как именно для таких рек наиболее просто применить метод актуализма и использовать данные о современных реках для восстановления гидрологических характеристик древних рек. Однако наиболее крупные реки обычно делятся на рукава, хотя есть и исключения, такие как Миссисипи и Енисей выше их дельт. Имеются морфометрические связи, из которых следует, что при увеличении расхода

**Таблица 2.** Среднее по бассейнам рек отношение шага излучин к ширине русла  $k_\lambda$  для современных и древних меандрирующих рек

**Table 2.** Average for river basins ratio of meander half-wavelength to the width of the channel  $k_\lambda$  for modern and ancient meandering rivers

Река	$k_\lambda$ совр	$\sigma_{k\lambda}$ совр	$k_\lambda$ древн	$\sigma_{k\lambda}$ древн
Днепр	6.8	1.8	6.4	1.95
Дон	7.5	3.0	8.0	2.8
Волга	5.0	1.75	6.3	1.0
Реки Западной Сибири	5.8	1.4	5.7	1.7

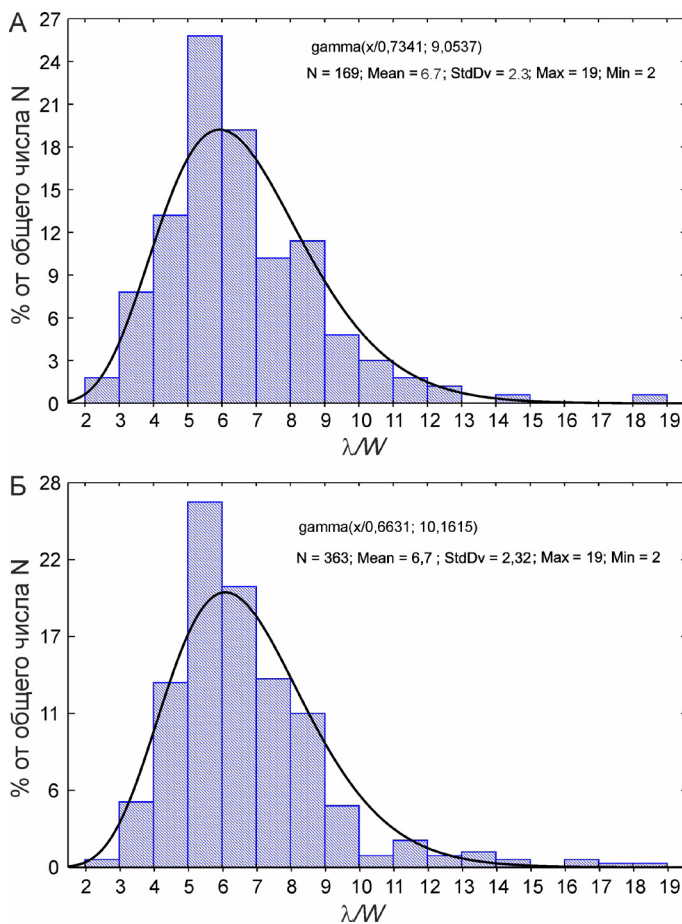
воды возрастает вероятность деления рек на рукава (Leopold, Wolman, 1960; Ромашин, 1968). Так что не исключено, что такие реки, как, например, Днепр в низовьях, в прошлом разделялись на рукава. Но морфометрия рек, разветвленных на рукава, намного сложнее, чем однорукавных рек (Чалов, 1980), и палеогидрологические построения для таких рек — дело будущих исследований.

**Распространение и типы палеорусел на южном макросклоне Восточно-Европейской равнины и на Западно-Сибирской низменности**

**Бассейн Волги.** В период формирования больших палеорусел уровень Каспийского моря стоял на высоких отметках в результате Хвалынской трансгрессии. Вследствие этого низовья самой Волги были затоплены при максимальном уровне моря примерно до устья р. Самары, при минимальном — до устья Большого Иргиза. Влияние высокого уровня хвалынского Каспия прослеживается на притоках Волги: в их низовьях на протяжении 20–30 км формировались террасы из аллювиально-дельтовых отложений (Обедиентова, 1977). В то же время на притоках нижней Волги с меандрирующими или многорукавными современными руслами сохранились наиболее хорошо морфологически выраженные фрагменты больших меандрирующих палеорусел на широких современных поймах (типы E1 и E2 по табл. 1). Наблюдаются и отдельные участки с унаследованными руслами, вплоть до типа А.

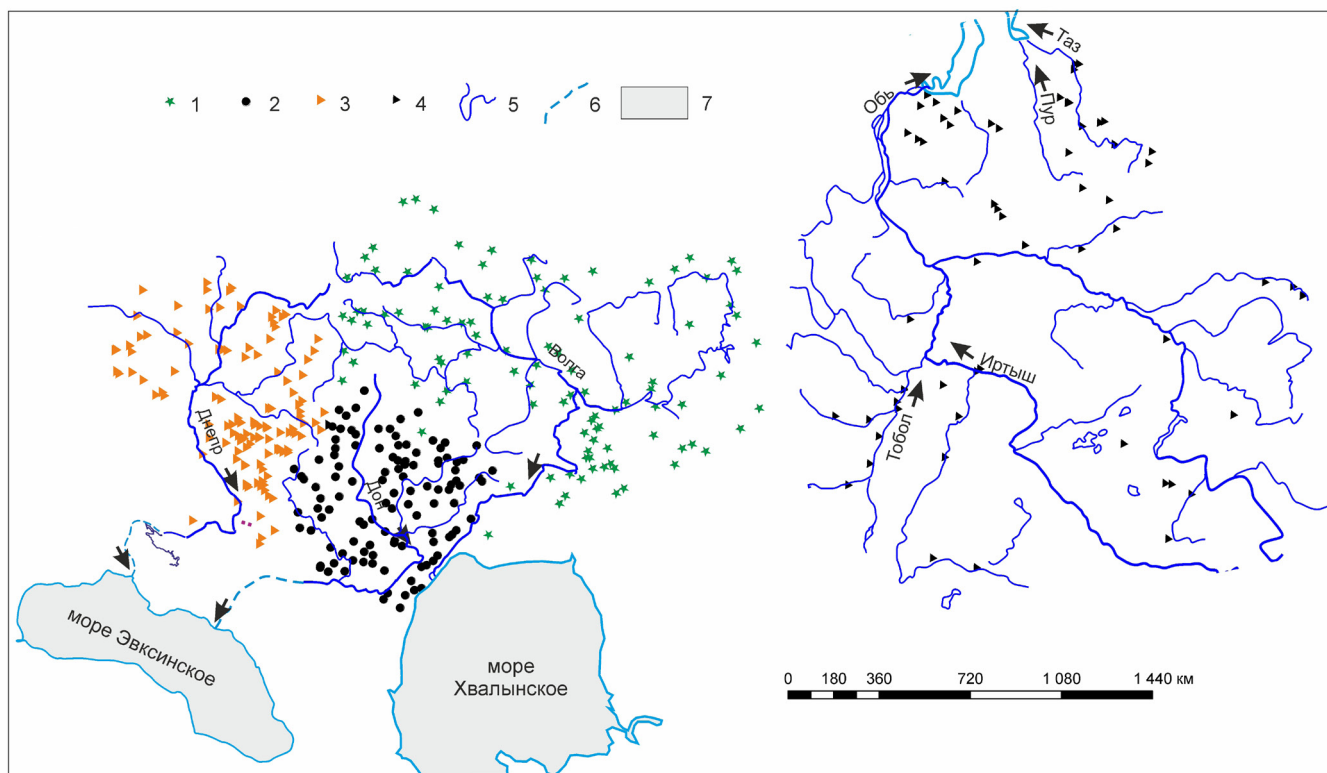
Выше по течению Волги, вне зоны влияния колебаний уровня Каспия, наблюдается чередование палеорусел на широкой пойме (типы С и E1) и различных типов наследования палеорусел современными реками, обычно меандрирующими (типы А, B1 и B2). Как уже упоминалось, В.Ю. Украинцев (2023) выделил в бассейне Волги более 1700 участков с макроизлучинами разных типов (включая меандровые цирки тылового шва поймы), но для морфометрического анализа были отобраны только немногим более 120 участков (рис. 5).

На р. Москве у с. Остров проведено бурение по поперечным профилям на перекате и плесе большого староречья. Здесь выполнено радиоуглеродное датирование аллювия, построена спорово-пыльцевая диаграмма, получены палеофлоры разного возраста для периода от конца плейстоцена до позднего дриаса, по формулам гидравлики проведена оценка руслонаполняющего расхода воды (Sidorchuk et al., 2009). Аналогичные работы проведены на р. Протве в палеорусле на первой террасе в черте г. Боровска



**Рис. 4.** Гистограмма отношения шага излучин  $\lambda$  к ширине русла  $W$ : А — для современных и Б — для древних рек бассейнов южного макосклона ВЕР и ЗСН

**Fig. 4.** Histogram of the ratio of meander half-wavelength and the width of the channel for А — modern and Б — ancient rivers of the basins on the southern megaslope of the East European Plain and West Siberian Lowland



**Рис. 5.** Распределение хорошо сохранившихся фрагментов крупных извилистых палеорусел на равнинах Северной Евразии: 1 – в бассейне Волги; 2 – в бассейне Дона; 3 – в бассейне Днепра; 4 – в бассейнах рек ЗСН; 5 – основные реки; 6 – продолжения рек на осушенном шельфе; 7 – морские бассейны в позднем плейстоцене

**Fig. 5.** Distribution of well-preserved fragments of large meandering paleochannels on the plains of Northern Eurasia: 1 – in the Volga basin; 2 – in the Don basin; 3 – in the Dnieper basin; 4 – in the river basins of West Siberian Lowland; 5 – main rivers; 6 – continuations of rivers on the exposed shelf; 7 – marine basins in the Late Pleistocene

(Sidorchuk et al., 2009). В.Ю. Украинцев с соавт. (2024) проанализировали структуру аллювия в более чем 30 палеоруслах по материалам буровых скважин, частично датированным.

**Бассейн Дона.** Бассейн р. Дон представляет собой уникальный объект для палеорусловых и палеогидрологических исследований. Во-первых, в отличие от других рек ВЕР и ЗСН, реки в бассейне Дона в период формирования палеорусел были врезаны практически на всем их протяжении. Уровень Черного моря в тот период контролировался условиями стока в проливах Босфор и Дарданеллы и был не выше –64 м абс. (Сидорчук и др., 2018). Устье Дона располагалось тогда на краю шельфа, отметки дна реки составляли –40 м абс. в районе современного Керченского пролива и –15 м абс. ниже устья р. Северский Донец (Неваленный, 2000). На участке от устья р. Черная Калитва до устья р. Воронеж русло Дона было врезано на 10–12 м относительно современного уровня воды (Хруцкий и др., 1974). Эта трансформация продольного профиля р. Дон происходила во время

формирования больших меандрирующих рек, так как на пойме р. Хопер бурением вскрыты большие палеорусла в разных стадиях врезания (Панин и др., 2013). Во-вторых, обычно остатки больших палеорусел распределены вдоль рек фрагментарно и разделены большими участками отсутствия таких остатков. Палеорусла в бассейне Дона часто прослеживаются вдоль рек без больших перерывов. Вероятно, хорошая сохранность палеорусел в бассейне Дона объясняется их врезанностью.

В низовьях Дона (в основном ниже устья р. Цимлы) река широкопойменная с пойменной много рукавностью и современными излучинами (тип F в табл. 1). Палеорусла на этом участке морфологически не выражены. Буровой профиль, проходящий через долину Дона в 16 км ниже устья р. Сал, показывает мощную толщу аллювия, трактуемого 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.

На большей части бассейна Дона современные русла так или иначе унаследовали хорошо выраженные палеорусла, а пойма или практически отсутствует (типы А–В), или относительно узкая (тип С). Отношение ширины древних русел к ширине современных 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 рек Северский Донец и Медведица пойма широкая (типы D–E). Здесь возможно относительное уменьшение ширины современных русел за счет распластывания потока половодья на пойме. Этим объясняются большие значения отношения ширины древних русел к ширине современных, часто лежащие в диапазоне 7–12.

Бурением в палеоруслах и на пойме р. Хопер выявлены широкие и глубокие поперечные профили палеорусел (Панин и др., 2013; Матлахова, 2021), выполнено датирование образцов аллювия. Здесь с большой степенью вероятности имеются и палеорусла, сформированные на начальных этапах врезания реки и расположенные на более высоких отметках, и глубоко врезанные, вероятно, более поздние палеорусла с днищами на более низких отметках.

*Бассейн Днепра.* Не менее ценный объект для исследования палеорусел представляет собой бассейн Днепра (Matoshko et al., 2002). Наличие порогов в низовьях Днепра исключает влияние изменений уровня Черного моря на трансформацию продольного профиля реки на всем ее протяжении выше порогов. Эта трансформация определялась климатическими изменениями в бассейне и, возможно, новейшими тектоническими движениями. Как и в бассейне Дона, в бассейне Днепра имеется большое количество хорошо сохранившихся фрагментов больших меандрирующих палеорусел. Особенно это характерно для левобережных притоков, впадающих в Днепр на участке непосредственно выше порогов: Орели, Хорола, Псела и др. На этих реках на небольших участках поймы сохранилось большое количество (до 10–12) крупных староречий, что повышает надежность морфометрических исследований. В целом в бассейне Днепра преобладают соотношения современных и древних русел типа D и E1.

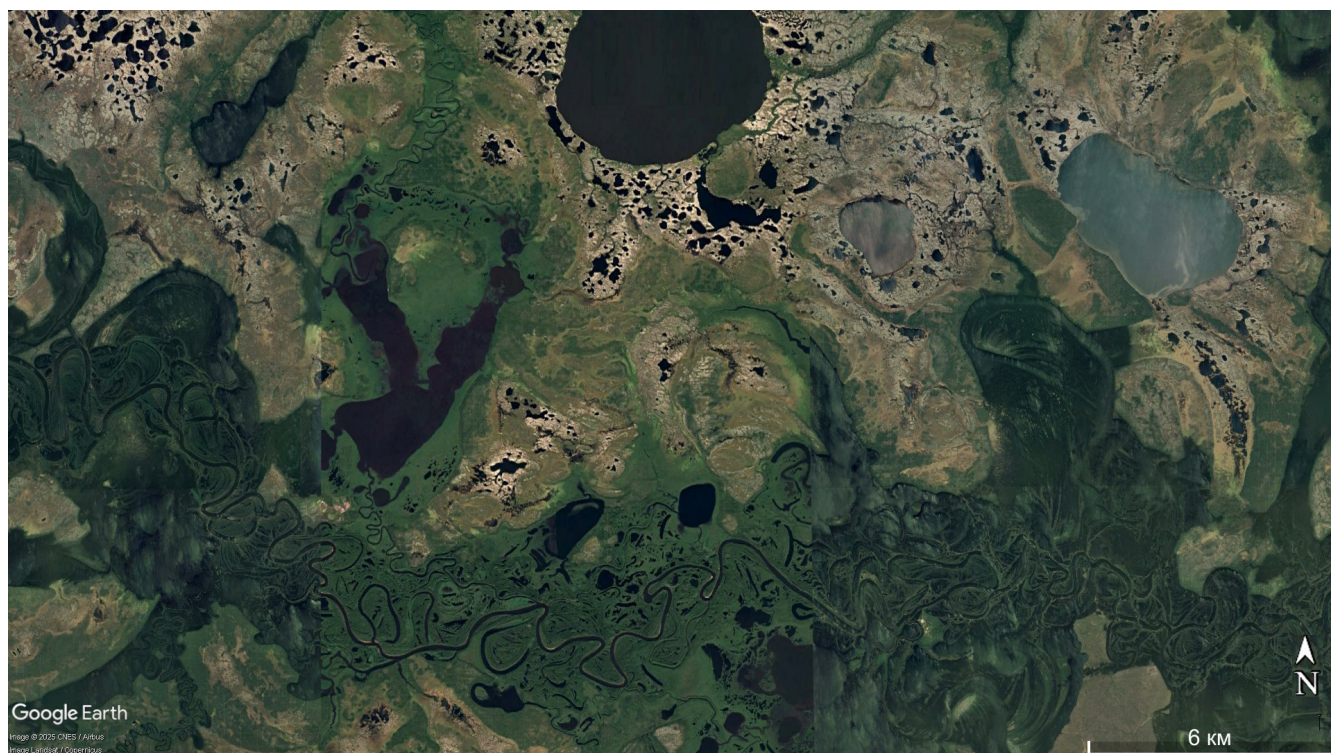
В верхней части бассейна Днепра, на реках Сейм и Свапа, проведено бурение по поперечным профилям и вскрыты широкие и глубокие поперечные сечения палеорусел (Панин и др., 2001; Borisova et al., 2006). Здесь выполнено радиоуглеродное

датирование аллювия, построена спорово-пыльцевая диаграмма, получены палеофлоры разного возраста для периода от конца пленигляциала до голоцена, по формулам гидравлики проведена оценка руслонаполняющего расхода воды.

*Бассейны рек Западно-Сибирской низменности.* Большие меандрирующие палеорусла на ЗСН распространены от тундры до сухой степи, однако их морфология сильно изменяется с севера на юг и поэтому будет характеризована более подробно. В долине р. Юрибей на Гыданском полуострове обнаружены, возможно, самые северные ( $70^{\circ}36'$  с. ш.) хорошо выраженные морфологические следы деятельности большой древней меандрирующей реки, которая, согласно (Гричук, 2002), протекала в пределах травяно-моховой тундры. На участке между устьями притоков Нгарка-Маретаяха и Маретаяха шаг излучин современной реки 1230 м, ширина русла — 150 м. Большое палеорусло с шириной 250 м на унаследованной пойме описывало излучины с шагом 2300 м. Ниже по течению, выше устья притока Ампосяха, шаг излучин современной реки увеличивается до 1420–1630 м, а ширина русла — до 220–245 м. На этом участке большое палеорусло с шириной 620–750 м описывало омеговидные излучины с шагом 3200–3800 м. В среднем размеры большого палеорусла превышали соответствующие морфометрические показатели современного русла в 2 раза.

Наибольшее количество хорошо сохранившихся фрагментов палеорусел выявлено в зоне древней перигляциальной лесотундры. Это в основном были реки в бассейнах нижней Оби, Надыма, Пура и Таза с крутыми, часто омеговидными излучинами, что указывает на устойчивость поверхности пойм этих рек во время затопления в половодье. Диапазон отношения ширины древних русел к ширине современных довольно широк — от 1.7 до 5.3, со средним значением чуть более 3. Аномально на этом фоне выглядит древнее русло р. Часелька, притока р. Таз, которое было в 7–8 раз шире современного, а его излучины были больше излучин современной р. Таз (рис. 6). В настоящее время фрагменты древних русел расположены на первых террасах рек.

Более десяти участков с фрагментами больших палеорусел обнаруживаются в зоне древнего березово-елового редколесья на притоках нижней Оби и нижнего Иртыша. Например, р. Вах (рис. 7) шириной 300 м в настоящее время формирует сегментные и омеговидные меандры с шагом 2100 м. Излучины древнего русла были более крутые, с шагом 6200 м и шириной русла 1700 м. В целом морфология больших русел зоны редколесья мало



**Рис. 6.** Пример крупных меандрирующих палеорусел в бассейне р. Таз — р. Часелька

**Fig. 6.** Example of large meandering paleochannels in the Taz River basin — the Chaselka River



**Рис. 7.** Пример крупных меандрирующих палеорусел в бассейне нижней Оби — р. Вах

**Fig. 7.** Example of large meandering paleochannels in the lower Ob basin — the Vakh River

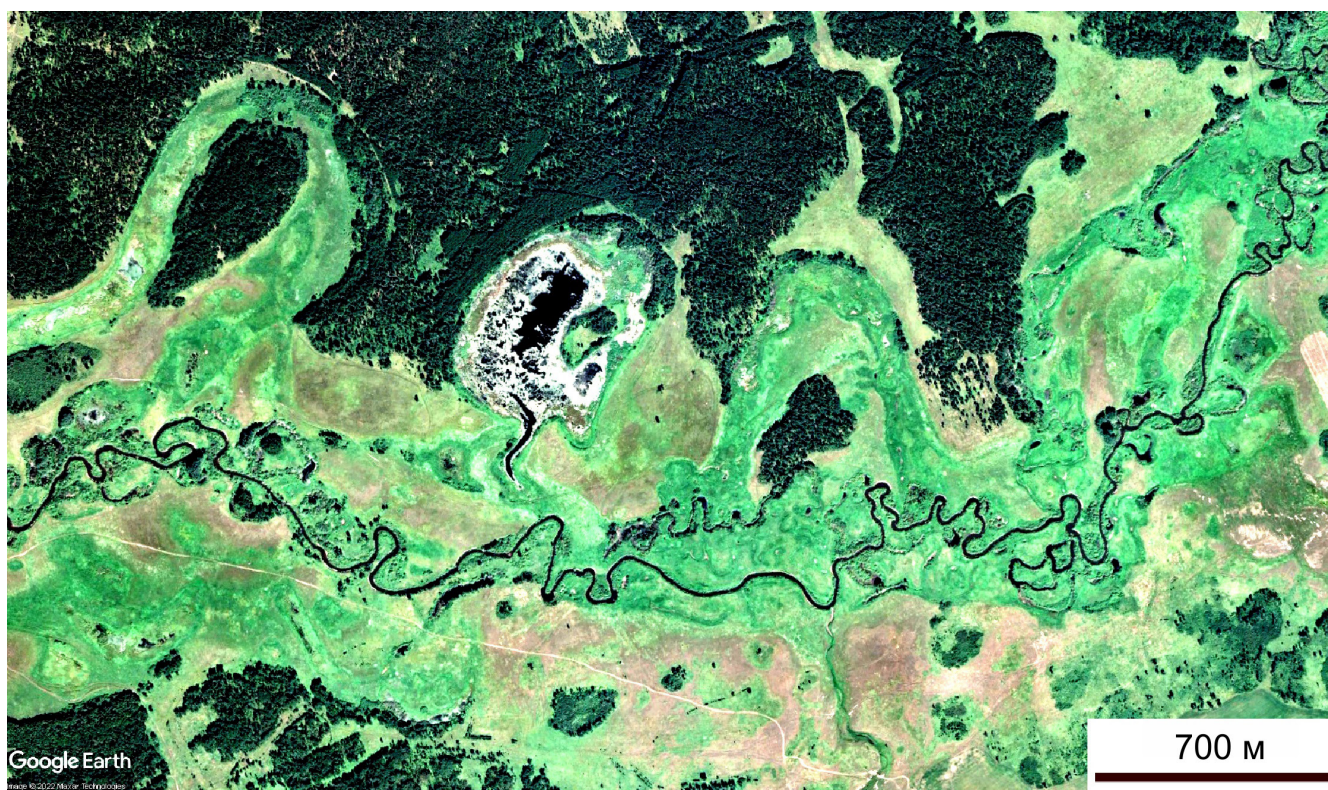


Рис. 8. Пример крупных меандрирующих палеорусел в бассейне верхней Оби — р. Кулунда

Fig. 8. Example of large meandering paleochannels in the upper Ob basin — the Kulunda River

отличается от морфологии русел более северных рек: диапазон отношения ширины древних русел к ширине современных здесь тоже велик — от 2.3 до 7, но среднее значение несколько больше — 3.5. Фрагменты древних русел также расположены на первых террасах рек.

В древней области перигляциальной лесостепи фрагменты больших палеорусел обнаружены вдоль правых притоков Оби на востоке и вдоль левых притоков Иртыша на западе. В сильно заболоченной центральной части ЗСН такие фрагменты, с большой вероятностью, также существовали (например, на первой террасе р. Васюган), но впоследствии были скрыты процессами торфонакопления. В зоне перигляциальной лесостепи продолжается увеличение отношения ширины древних русел к ширине современных по сравнению с более северными зонами: диапазон от 3 до 12, среднее значение — 5.9.

На юге и юго-западе ЗСН, в зоне древних полынно-разнотравных и полынно-злаковых степей, на первой террасе и на пойме Тобола и Ишима фрагменты больших палеорусел многочисленны и впервые обнаружены И.А. Волковым (1960, 1963). На Тоболе ниже р. Кустанай выявлено

наибольшее отношение ширины древних русел к ширине современных: 19. Здесь река меандрирует по широкой унаследованной пойме, ширина ее русла 20 м, шаг излучин 100 м. Излучины древнего русла шириной 380 м были более крутые, с шагом 1200 м. В этой же зоне, в восточной ее части на р. Кулунде отношение ширины древних русел к ширине современных равно 10–11 (рис. 8). В целом в этой области диапазон отношения ширины древних русел к ширине современных 2.8–19, его среднее значение — 8.3. Здесь хорошо выражена унаследованная пойма, на которой расположены фрагменты древних русел.

На юго-востоке Западной Сибири, в Степном Алтае, в области распространения остепненных сосновых и березовых лесов, на широких унаследованных поймах левых притоков верхней Оби — Чулыма, Чарыша, Алея — хорошо выражены староречья больших палеорусел. Так, пойма шириной 8 км в приустьевой части р. Чарыш была сформирована древней большой рекой с шириной русла 280 м и шагом излучин 1750 м. Современная река с шириной русла 160 м, шагом излучин 1100 м и поясом меандрирования шириной не более 3 км наследует лишь часть этой древней поймы.

**Возраст больших палеорусел**

Полученная к настоящему времени информация о возрасте больших палеорусел невелика по объему и довольно неоднородна для разных объектов. Поэтому в настоящей статье ограничимся перечислением опубликованных ранее радиоуглеродных дат, пересчитанных в значения калиброванного возраста с помощью калибровочной кривой Reimer et al., 2020; ниже в статье всюду приводятся калиброванные даты, за исключением особо оговоренных случаев.

Возраст больших русел палеорек ВЕР определен по данным радиоуглеродного и пылецевого анализа старичных отложений. В долине р. Хопер у г. Поворино (Панин и др., 2013) большое палеоруло отмерло более 11 тыс. л. н. Палеоизлучины на пойме р. Сейм у г. Льгова и р. Свапы у ее устья (Панин и др., 2001) были отшнурованы от основного русла около 14 тыс. л. н. В долине р. Протвы у г. Боровска отмирание большого палеорула произошло 12–13 тыс. л. н. (Панин, Сидорчук, 2006). Палеоруло р. Самары (Kremenetski et al., 1999) также было заброшено около 13 тыс. л. н. Большая излучина р. Москвы у с. Остров была отчленена от реки более 15 тыс. л. н. (Панин и др., 2005; Sidorchuk et al., 2009). Для бассейна Волги получены датировки в пределах 14–18 тыс. л. н. еще для 19 рек (Украинцев и др., 2024). Все эти палеореки характеризовались хорошо развитыми меандрами, часто омеговидными. Их формирование продолжалось не менее 1–2 тыс. лет. Поэтому образование больших рек ВЕР можно отнести к периоду 14–18 тыс. л. н., т. е. к концу пленигляциала и позднеледниковью.

Имеющиеся данные о периоде активной деятельности больших рек в Западной Сибири были рассмотрены в (Сидорчук и др., 2008) с опорой на работы И.А. Волкова с коллегами. К сожалению, новых данных за прошедшее время не прибавилось, поэтому мы повторяем ранее сделанные выводы, с приведением радиоуглеродного возраста к календарному. Время завершения периода активности больших рек на ЗСН устанавливается по серии датировок для I террасы р. Бердь около Новосибирска (Зыкина и др., 1983). Наиболее ранняя 14С дата —  $12\,820 \pm 500$  (СОАН-11) — позволяет оценить время отчленения большой палеоизлучины Берди: ранее 15.3 тыс. л. н. Исходя из этого, можно предположить, что на ЗСН и на ВЕР большие реки были активны более или менее одновременно (в геологическом смысле), в период с 14 до 18 тыс. л. н.

**Гидрологические данные**

Данные гидрологических наблюдений на реках СССР публиковались в гидрологических ежегодниках. Обобщение этих данных было проведено в 20 томах серии «Ресурсы поверхностных вод СССР». Для рек России в настоящее время проводится второе обобщение данных — от начала наблюдений до 2017 г. включительно (например, (Георгиевский, 2020)). В настоящем исследовании мы опирались на данные, приведенные в первой обобщающей работе, так как гидрологический режим рек существенно изменился в конце 1970-х гг., в первую очередь за счет уменьшения расходов воды половодья.

**МЕТОДЫ ПАЛЕОГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЙ****Общие подходы к палеогидрологическим реконструкциям**

В количественной палеогидрологии используются три основных способа палеогидрологических реконструкций:

1. Расчет стока палеорек по палеоклиматическим реконструкциям с использованием уравнений водного баланса (Schumm, 1965; Gelfan et al., 2024).
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 палеорула (Dury, 1965; Маккавеев и др., 1969).

Все эти методы широко обсуждались и применялись для реконструкции речного стока по всему миру. В результате были получены такие палеогидрологические характеристики, как среднемаксимальный и среднегодовой сток, например, для рек на территории Западной и Центральной Европы (Popov et al., 2008; Vandenberghe, Sidorchuk, 2019), ВЕР (Сидорчук и др., 2008) и ЗСН (Волков, 1963).

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

Основным методом палеогидрологических реконструкций, принятым в данной работе, является метод морфометрических зависимостей на основе гидравлической геометрии палеоруслу. 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, можно 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 средним максимальным расходом воды 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, чаще, при расходе воды одинаковой обеспеченности. Обычно таким расходом воды является расход при уровне руслонаполнения в бровках поймы (Leopold, Wolman, 1960). Руслонаполняющий расход воды обычно близок к среднему максимальному расходу  $Q_{\max}$  (Маккавеев, 1964) и так называемому руслоформирующему расходу, действие которого на русло равнозначно среднему действию всех расходов воды, составляющих гидрограф (Маккавеев, 1955; Blom et al., 2017). Обычно такая связь записывается в виде:

$$W = a_w Q^b \tag{4}$$

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  $\lambda$  и радиус их кривизны  $R$ .

Для целей количественной палеогидрологии зависимость (4) записывается в виде:

$$Q_{\max} = aW^b \tag{5}$$

Коэффициент  $a$  и показатель степени  $b$  в формуле (5) определяются по данным измерения и расчета средних максимальных расходов половодья на гидропостах и измерения ширины русел современных рек в бровках поймы. Для учета вариабельности коэффициента  $a$  в пространстве он может быть

рассчитан для каждого гидрологического створа по формуле:

$$a = Q_{\max} / W^b \tag{6}$$

Тогда строится карта изменения усредненных значений  $a$  по территории речных бассейнов, по которой эти коэффициенты определяются в точках расположения фрагментов древних русел с измеренными значениями ширины  $W_{\text{past}}$ .

**Определение связи между расходом на максимуме половодья и площадью водосбора**

Известно (Евстигнеев, 1990), что среднемноголетний расход воды на максимуме половодья  $Q_{\max}$  увеличивается нелинейно с увеличением площади водосбора  $F$ :

$$Q_{\max} = \frac{q_0 F}{(F + 1)^n} \delta \tag{7}$$

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  $\delta$ .

Эффект нелинейности в зависимости (7) реализуется редукцией модуля стока половодья и проявляется в больших речных бассейнах. При площади водосбора меньше некоторой критической величины  $F < F_u$  показатель степени редукции  $n$  существенно уменьшается, практически становится равным нулю, а модуль максимального стока для таких водосборов равен модулю стока на единичном водосборе  $q_0$  с учетом ландшафтных поправок.

Для древних рек с известной площадью водосбора и рассчитанным по формуле (5) среднегодовым максимальным расходом воды за период половодья  $Q_{\max\_past}$  строятся зависимости (7) и оцениваются коэффициенты редукции. Это дает возможность привести максимальный расход к единичной площади водосбора  $F_u$  по формуле (8):

$$Q_{\max\_u} = \delta q_0 F_u (F_u + 1)^{-n} \tag{8}$$

и вычислить слой суточного максимального стока (мм) для водосборов с площадью не более  $F_u$  по формуле (9):

$$X_{\max\_past} = 86.4 \frac{Q_{\max\_past} (F + 1)^n}{F (F_u + 1)^n} \tag{9}$$

Эти значения не зависят от площади водосбора, и их можно (в усредненном виде) положить на карту.

### **Оценка среднемноголетнего годового расхода воды древних рек**

Как уже отмечалось, морфометрические зависимости типа формулы (5) дают возможность оценить только максимальный расход воды, который определяет ширину русла меандрирующей реки. Зависимости (8) и (9) позволяют перейти от максимального расхода в данном створе к модулю максимального суточного стока для единичного малого водосбора. Переход от максимального суточного стока к среднегодовому требует применения различных гидрологических и палеогеографических гипотез по выбору современного бассейна-аналога для древней реки.

В настоящем исследовании применяются два подхода, и для обоих необходимо найти современный бассейн — аналог бассейна древней реки. Первый подход основан на переходе от среднемаксимального расхода воды для периода половодья  $Q_{\max}$  к среднегодовому расходу  $Q_{\text{mean}}$  на основе переходного коэффициента  $Y$ , который определяется для современного бассейна — аналога бассейна древней реки.

$$Y = Q_{\text{mean}}/Q_{\max} \quad (10)$$

В рамках второго подхода применяется гидрологическая модель снеготаяния. Для известного хода температуры воздуха для современного бассейна-аналога с помощью модели рассчитываются величины максимального суточного слоя стока для периода половодья  $X_{\max}$  для разных заданных величин запасов воды в снеге к началу снеготаяния  $H_{\text{snow}}$ , которые равны слою стока за половодье минус потери. Затем по этой рассчитанной зависимости  $H_{\text{snow}}$  от  $X_{\max}$  выбирается величина запасов воды в снеге к началу снеготаяния  $H_{\text{snow\_past}}$ , соответствующая максимальному суточному модулю стока  $X_{\max\_past}$  для древней реки, полученному по морфологии палеорусел. В работе (Matveeva, Sidorchuk, 2020) была предложена упрощенная модель поступления талых вод на элементарный водосбор, являющаяся синтезом моделей В.Л. Комарова (1961) и Ю.Б. Виноградова (1983). Эта модель калибрована по данным измерений стока воды во время снеготаяния на малых водосборах в тундре на полуострове Ямал, ее применение для целей палеогидрологии апробировано в (Сидорчук и др., 2023).

### **Выбор современных ландшафтно-климатических аналогов**

Выбор районов-аналогов для палеоландшафтов в современных условиях осуществляется на основе гидрологической аналогии (Глушков, 1933). 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). В настоящем исследовании применены два подхода.

В рамках первого подхода границы района-аналога определяются путем эколого-географического анализа палеоботанических (в основном палинологических) данных (Гричук, 1969; Борисова, 2021). Для датированных образцов аллювия палеореки определяется состав ископаемых флор. Для этого может быть использовано определение видов растений как по макроостаткам (плоды и семена, листья, древесина и проч.), так и по пыльце и спорам. По картам современных ареалов видов растений — компонентов каждой палеофлоры устанавливаются современные районы совместного произрастания всех этих растений или их большинства. 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. Каждый такой район принимается в качестве современного ландшафтно-климатического аналога для бассейна данной палеореки соответствующего возраста, и внутри него определяются необходимые климатические показатели.

В рамках второго подхода для построения климатического аналога предлагается следующая процедура. Климат для этапа 21 тыс. л. н. — максимума последнего оледенения — исследовался на многочисленных моделях глобальной циркуляции атмосферы и океана (МОЦАиО), и результаты такого моделирования опубликованы как усредненные данные результатов расчетов по набору разных моделей (Gutiérrez et al., 2021). Моделирование климата для периода начала дегляциации около 18 тыс. л. н. (Karsch et al., 2022) показало, что незначительные изменения по сравнению с максимумом оледенения укладываются в изменчивость результатов расчета по разным моделям. Сопоставление рассчитанных палеоклиматических характеристик с современными, измеренными на метеостанциях, позволяет выбрать метеостанции-аналоги для каждого узла расчетной сетки модели и использовать измеренный на этих метеостанциях

ход температуры воздуха за период снеготаяния в качестве входных данных для гидрологической модели снеготаяния. По такой модели при заданном ходе температуры воздуха определяются запасы воды в снеге на начало снеготаяния (т. е. величина стока за половодье плюс потери), которые необходимы для формирования слоя максимального суточного стока, полученного для древних рек по морфометрическим данным.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

#### Связь между шириной русла и расходом воды

Искомая связь устанавливалась для современных рек с унаследованным руслом и узкой поймой (типы А–С в табл. 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. Ширина рек в бровках поймы  $W_{mod}$  (м) измерялась по космическим изображениям с сайта Гугл-Планета; средние расходы максимума половодья  $Q_{max\_mod}$  (м<sup>3</sup>/с) получены для периода измерений до 1970 г. с относительно стабильным гидрологическим режимом рек. Получены следующие коэффициенты и показатели степени по бассейнам рек ВЕР и ЗСН (табл. 3). Для сопоставления эти характеристики приведены также для рек северо-востока европейской территории России и Восточной Сибири, протекающих в условиях, близких к ландшафтным условиям формирования больших древних рек.

Средние значения показателя степени  $b$  находятся в пределах 1.28–1.42, т. е. практически

совпадают как для современных рек ВЕР, так и для рек в пределах криолитозоны Восточной и Западной Сибири. Поэтому все вычисления проводились при  $b = 1.37$ .

Гораздо существеннее вариабельность коэффициента  $a$  как между разными речными бассейнами, так и внутри одного бассейна. Поэтому расчеты максимальных расходов воды в древних реках по формуле (5) с показателем степени  $b = 1.37$  проведены в двух вариантах значений коэффициента  $a$ : 1) коэффициент  $a$  разный для разных рек разных бассейнов, согласно табл. 3, но одинаковый для рек внутри бассейна; 2) коэффициент  $a$  разный для разных рек, вычислен по формуле (6).

Для расчетов по второму варианту коэффициент  $a$  рассчитывался по формуле (6) для каждого гидрологического створа, использованного для построения зависимости (5). Методом кригинга строилась карта изменения значений  $a$  по территории речных бассейнов. Коэффициенты  $a$  определялись по этой карте в точках расположения фрагментов древних русел с измеренными значениями ширины  $W_{past}$ .

Как и следовало ожидать, значения вычисленных максимальных расходов по этим двум вариантам хорошо коррелируются ( $R^2$  не менее 0.94). Различия определяются пространственными вариациями значений коэффициента  $a$ . Так как различия между вариантами невелики, а учет изменчивости коэффициента  $a$  создает некоторую ложную корреляцию между значениями расходов воды в древних и современных реках, в дальнейшем рассматривается только первый вариант: коэффициент  $a$  разный для разных рек разных бассейнов, согласно табл. 3, но одинаковый для рек внутри бассейна.

**Таблица 3.** Коэффициенты и показатели степени в формуле (5) по бассейнам рек ( $M$  – среднее,  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение,  $C_v$  – коэффициент вариации,  $\sigma/M$ )

**Table 3.** Coefficients and exponents in formula (5) for river basins ( $M$  – mean,  $\sigma$  – standard deviation,  $C_v$  – coefficient of variation,  $\sigma/M$ )

Река	Коэффициент $a$			Показатель степени $b$		
	среднее	$\sigma$	$C_v$	среднее	$\sigma$	$C_v$
Волга	1.66	2.38	1.43	1.38	0.16	0.12
Дон	1.74	1.29	0.74	1.37	0.1	0.07
Днепр	1.75	1.38	0.79	1.28	0.09	0.07
Реки Западной Сибири	0.86	1.52	2.47	1.37	0.08	0.06
Реки северо-востока ВЕР	0.96	1.29	1.34	1.34	0.05	0.04
Реки Восточной Сибири	0.96	1.85	1.93	1.42	0.11	0.08

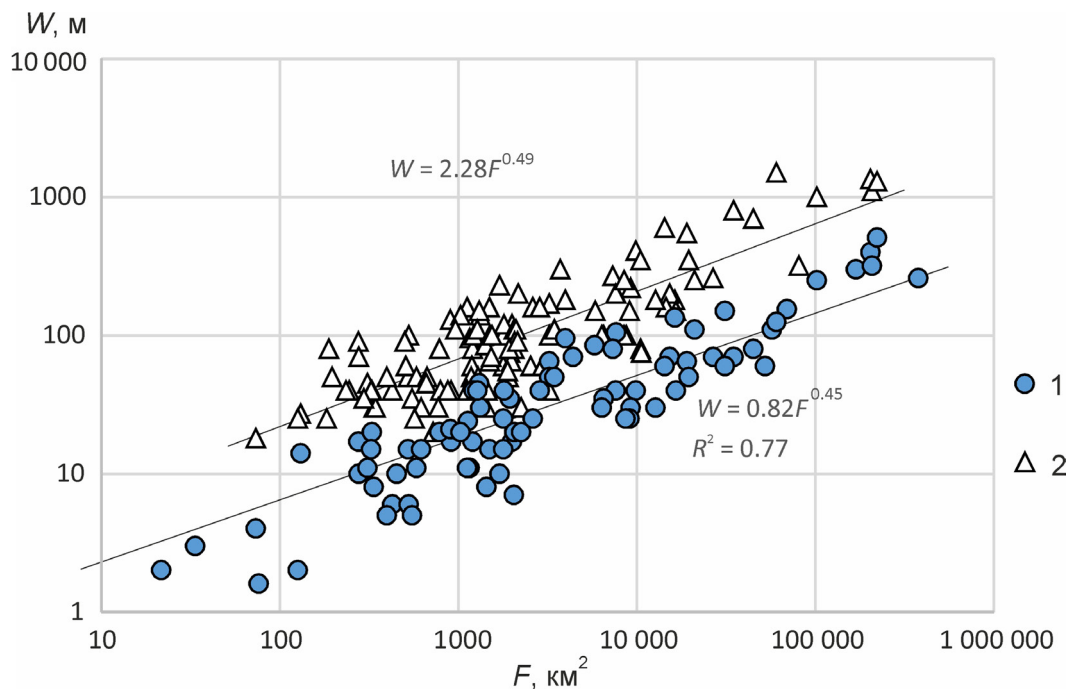
**Связь между модулем стока на максимуме половодья и площадью водосбора для палеорек**

Изменение ширины речных русел по мере увеличения площади водосбора. Изменение ширины русел, современных и древних, по длине рек по мере увеличения площади водосбора может быть описано степенными функциями вида  $W = pF^q$ . Для бассейна р. Дон показатели степени в этих функциях примерно одинаковы для современных и древних рек (рис. 9), т. е. отношение ширины древних рек к ширине современных  $W_{\text{past}}/W_{\text{mod}}$  в одних и тех же пунктах не зависит от площади водосбора. Для бассейна р. Дон такое соотношение в среднем не меняется и с изменением ландшафтных зон, современных и древних. Как уже упоминалось выше, отношение ширины древних русел к ширине современных 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 рек Северский Донец и Медведица пойма широкая (типы D–E). Здесь возможно относительное уменьшение ширины современных русел за счет распластывания потока половодья на пойме. Этим объясняются большие значения отношения ширины древних русел к ширине современных, часто лежащие в диапазоне 7–12. Бурение на таких

поймах показывает широкие и глубокие поперечные профили палеорусел (Панин и др., 2013).

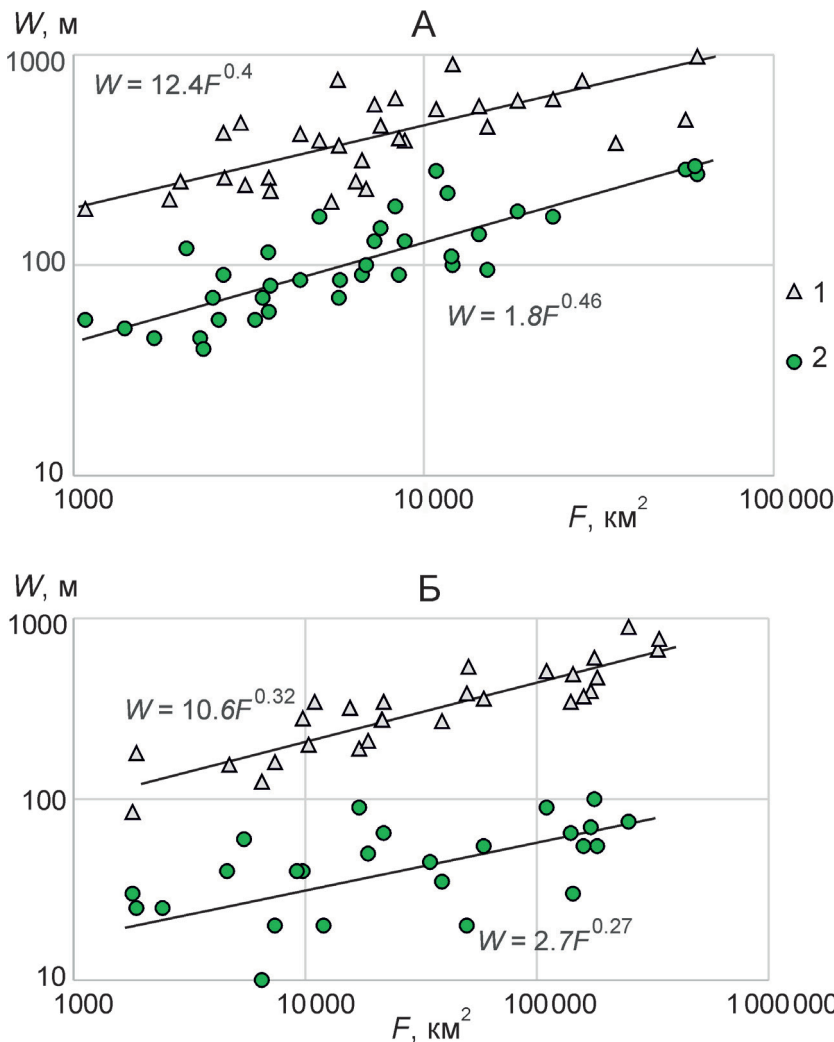
Для бассейнов рек ЗСН соотношение ширины русла древних и современных рек в тех же пунктах также не зависит от площади водосбора, показатели степени в функциях  $W = pF^q$  примерно одинаковы для современных и древних рек (рис. 10). Но здесь соотношение коэффициентов  $p$  в этих функциях и соответственно отношение  $W_{\text{past}}/W_{\text{mod}}$  существенно различны для разных ландшафтных зон. Как уже отмечалось выше, среднее значение  $W_{\text{past}}/W_{\text{mod}}$  увеличивается от 2.0–3.5 в области современной вечной мерзлоты, которая примерно соответствует древней области тундры и тайги, до 8 в области перигляциальных степей (современные средняя и южная тайга и лесостепь). Показатели степени  $q$  также различны для разных ландшафтных зон: 0.45–0.46 для рек северной части равнины (севернее 60° с. ш.) и 0.27–0.32 для рек ее южной части, но их значения близки для древних и современных рек.

Иная картина характерна для бассейнов Волги и Днепра. Здесь показатели степени в функциях  $W = pF^q$  существенно различаются для современных и древних рек (рис. 11). Для современных рек показатели степени  $q$  составляют 0.47 для бассейнов и Волги, и Днепра, что близко к значениям для бассейна Дона и севера ЗСН (0.45).



**Рис. 9.** Связь между шириной русла при уровне руслонаполнения  $W$  и площадью водосбора  $F$  для: 1 – современных и 2 – палеорек бассейна р. Дон

**Fig. 9.** Relationship between bankfull width  $W$  and the catchment area  $F$  for 1 – modern and 2 – paleorivers of the Don River basin



**Рис. 10.** Связь между шириной русла при уровне руслонаполнения  $W$  и площадью водосбора  $F$  для: 1 – современных и 2 – палеорек бассейнов рек северной части ЗСН (А) и бассейна р. Обь южнее Северных Увалов (Б)

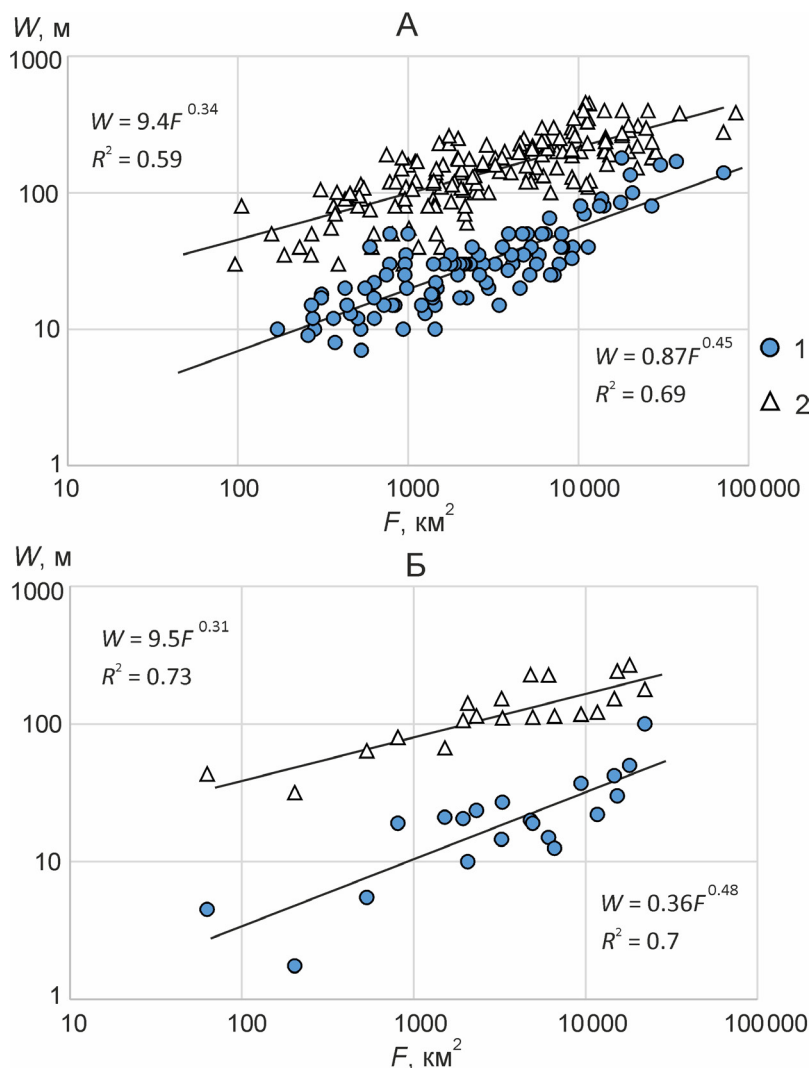
**Fig. 10.** Relationship between bankfull width  $W$  and the catchment area  $F$  for 1 – modern and 2 – paleorivers of the river basins (А) of the northern part of Western Siberia and (Б) of the Ob River basin south of the Severnye Uvaly

Для древних рек показатели степени  $q$  составляют 0.37 для бассейна Волги и 0.32 для бассейна Днепра. Это означает, что отношение  $W_{\text{past}}/W_{\text{mod}}$  уменьшается по длине рек с увеличением площади бассейна. Это особенно хорошо видно для тех рек, для которых достаточно данных, чтобы построить местные функции  $W = rF^q$  для современных русел и для палеорусел. Например, на поймах рек Хорол, Псел и Сула фрагменты палеорусел сохранились очень хорошо и прослеживаются от самых верхних до устья (рис. 11Б). Отношение  $W_{\text{past}}/W_{\text{mod}}$  для Хорола уменьшается от 9–18 до 4 при увеличении площади водосбора с 60 до 3700 км<sup>2</sup>.

*Расчет модуля стока на максимуме половодья.* Для больших палеорек с помощью зависимости (5) рассчитаны среднесезонные максимумы расходов воды половодья  $Q_{\text{max\_past}}$ . Зависимость этих величин от площадей водосбора современных рек в конкретных створах во многом определяется связями ширины палеорусел с площадью водосбора, рассмотренными в предыдущем разделе. Показатели степени редукции  $n$  для разных палео-

ландшафтов внутри каждого бассейна ВЕР статистически не различаются, но различны для разных бассейнов. Так, редукция максимальных расходов в палеореках в бассейне р. Дон сравнительно невелика ( $n = 0.27$ ) и мало отличается от редукции на современных реках. В бассейнах Волги и Днепра показатели степени редукции  $n$  могут быть больше современных: 0.3 для Днепра и до 0.35 для нижней Волги. Это связано с разными типами зависимости ширины русел от площади водосбора для современных и древних рек. Однако такая редукция максимума волны половодья в целом не противоречит рекомендациям по назначению этого показателя в разных ландшафтных зонах (Евстигнеев, 1990).

На реках северной части ЗСН (севернее Сибирских Увалов) показатель степени редукции для древних рек  $n = 0.27$ , что несколько больше современного (0.22), но в пределах изменчивости для современных рек России. В этой области палеореки могли быть врезаны из-за регрессии Мирового океана. Степень этого врезания не могла быть высокой, так как осушенный шельф Карского моря широкий



**Рис. 11.** Связь между шириной русла при уровне руслонаполнения  $W$  и площадью водосбора  $F$  для: 1 – современных и 2 – палеорек (А) всего бассейна Днепра и (Б) бассейнов левых притоков южного Днепра (реки Псел, Хорол, Сула)

**Fig. 11.** The relationship between bankfull channel width  $W$  and the catchment area  $F$  for: 1 – modern and 2 – paleorivers: (А) of the entire Dnieper basin and (Б) of the basins of the left tributaries of the southern Dnieper (the Psel, Khorol, and Sula rivers)

и пологий. Тем не менее большинство фрагментов палеорусел в северной части ЗСН расположены на первых террасах, т. е. некоторое врезание рек там произошло. На реках южной части низменности было велико значение климатической зональности и общего уменьшения стока с севера на юг. Это явление хорошо заметно при использовании показателя степени редукции для древних рек  $n = 0.27$  и для рек юга низменности.

#### **Распределение максимального суточного слоя стока половодья по площади бассейнов**

Для дальнейшего анализа слоя стока его необходимо было привести к единичной (критической) площади водосбора. Для древних рек нет возможности установить величину единичной (критической) площади водосбора из-за значительного разброса точек в зависимостях  $Q_{\max} = f(F)$  в области малых площадей водосборов. Поэтому для установления критической площади воспользуемся данными наблюдений на современных реках. Для

современных рек бассейна Дона критическая площадь водосбора близка к  $1000 \text{ км}^2$ . В бассейнах рек с площадями меньше критической величины максимальный расход воды изменяется с площадью водосбора линейно, а модуль стока от площади водосбора не зависит (см. рис. 6 в (Сидорчук, 2023)). Эти наблюдения дают возможность и для древних рек установить критическую площадь водосбора в  $1000 \text{ км}^2$  и привести к этой площади модули стока максимума половодья древних (и, для сравнения, современных) рек по формуле (9). 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 (с использованием кригинга) может быть показано на карте (рис. 12), и могут быть получены средние величины для отдельных бассейнов. В табл. 4 вынесены результаты расчета средних, среднеквадратических отклонений и коэффициентов вариации

величин  $X_{\max}$  для современных рек и описанного выше варианта 1 расчета максимальных расходов воды для древних рек, а также отношения средних  $X_{\max}$  для древних и современных рек.

Изменение максимального слоя стока древних рек по территориям речных бассейнов вполне закономерно. Хорошо выражена общая тенденция к уменьшению максимального суточного слоя стока с севера на юг как для рек ЗСН (от 60–80 до 30–40 мм/сут), так и для рек южного мегасклона ВЕР (от 60–80 до 20–30 мм/сут). Средние по территориям величины максимального слоя стока составляли 50 мм/сут на ВЕР и 54 мм/сут на ЗСН.

Неравномерность максимального стока на ВЕР была обусловлена в основном орографическими эффектами: даже невысокие возвышенности (с наибольшими высотами 250–300 м) определяли асимметрию распределения слоя стока — увеличение на западных склонах и уменьшение на восточных. Существенное влияние оказывал Уральский хребет, его воздействие приводило к тому, что в бассейне Камы слой стока был больше, чем в левобережных притоках Иртыша и нижней Оби. Орографические эффекты существенно маскируют неравномерность максимального стока по меридиану как в прошлом, так и в современности. Тем не менее она хорошо видна в древности в центральной части ВЕР и особенно на востоке бассейна Волги. Здесь эта неравномерность проявлялась в полной мере: градиент суточного слоя максимального стока по меридиану от 59°30' до 51°30' с. ш. составлял 6.4 мм/град (51 мм, от 80 до 29 мм). На ЗСН неравномерность максимального стока по меридиану также проявлялась хорошо, хотя и с меньшим градиентом: от 68°30' до 49°30' с. ш. градиент составлял 3.5 мм/град (66 мм, от 81 до 15 мм). Градиент неравномерности современного максимального стока на ЗСН вдвое меньше, чем был 18 тыс. л. н.

Очень большие величины  $X_{\max}$ , близкие к слою максимальной суточной водоотдачи на малых водосборах во время снеготаяния  $h_{\max\_past}$ , предполагают наличие на равнинах Северной Евразии в конце плейстоцена — начале позднеледниковья значительных запасов воды в снеге к началу весны и дружного весеннего снеготаяния. Пространственное распределение максимального слоя стока показывает, что поступление влаги на ВЕР шло преимущественно с северо-запада на юго-восток, а на ЗСН — с северо-востока на юго-запад.

**Годовой сток воды древних рек**

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 аналогии приходится искать в ландшафтах современных. В настоящем исследовании применены два метода поиска современных гидроклиматических аналогов для конца плейстоцена — начала позднеледниковья: 1) по палеоботаническим данным и 2) на основании результатов моделирования климата на МОЦАиО.

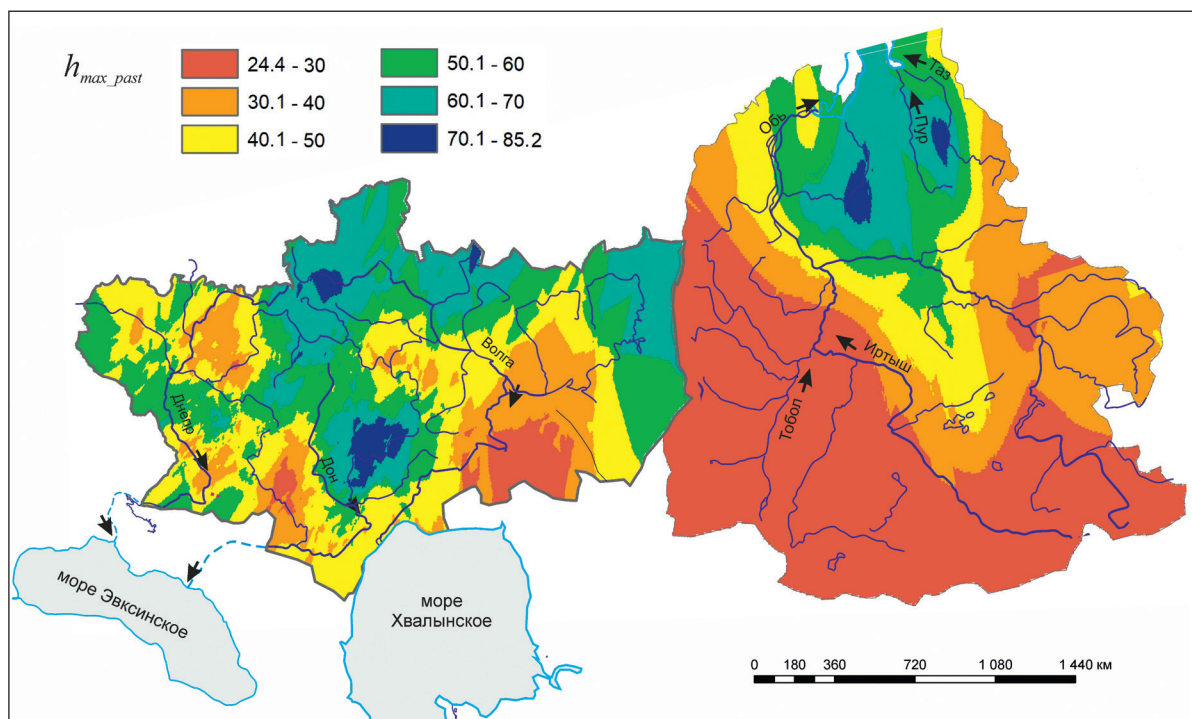
*Реконструкция гидроклиматических условий палеофлористическим методом.* Для реконструкции расходов воды в палеореках с изученной морфометрией были использованы данные по датированным ископаемым флорам из нескольких опорных разрезов (табл. 5). По этим флорам были построены центры современной концентрации входящих в них видов растений и количественно оценены климатические характеристики районов-аналогов для интервала 14–18 тыс. л. н. Для мест обнаружения палеофлор и центров их современной концентрации

**Таблица 4.** Результаты расчета характерных величин максимального суточного слоя стока ( $X_{\max}$ ) для периода паводка на малых водосборах для современных и древних рек ( $M$  — среднее,  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение,  $C_v$  — коэффициент вариации,  $\sigma/M$ )

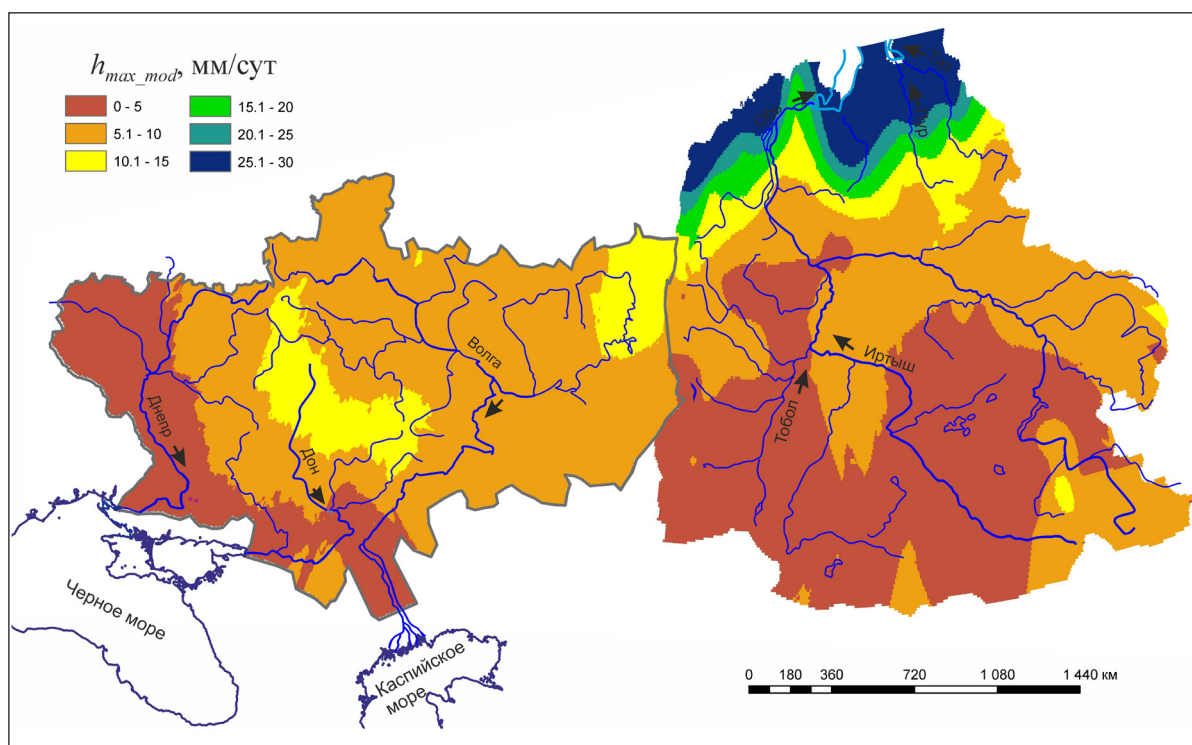
**Table 4.** Results of calculation of characteristic values of the maximum daily runoff depth for the flood period in small catchments for modern and ancient rivers ( $M$  — mean,  $\sigma$  — standard deviation,  $C_v$  — coefficient of variation,  $\sigma/M$ )

Реки	Современные			Древние			Отношение средних $X_{\max\_past}/X_{\max\_mod}$
	$M$	$\sigma$	$C_v$	$M$	$\sigma$	$C_v$	
Волга	8.3	1.8	0.22	50.6	12.9	0.25	6.1
Дон	7.2	2.7	0.38	50.7	12.5	0.25	7.0
Днепр	4.9	2.1	0.43	48	7.3	0.15	9.8
Реки севера Западной Сибири	25.4	9.8	0.39	64	4.7	0.07	2.5
Обь	6.8	5.8	0.85	54	8.1	0.15	7.9

А



Б



**Рис. 12.** Распределение слоя максимальной суточной водоотдачи во время снеготаяния  $h_{max\_past}$  (в мм/сут) для единичного водосбора ( $F \leq 1000 \text{ км}^2$ ) (без учета трансформации стока при склоновом сбегании) для бассейнов рек южного мегасклона ВЕР и ЗСН: А – в период формирования больших рек, 14–18 тыс. л. н.; Б – для современных рек

**Fig. 12.** Distribution of the daily surface runoff depth during the snow thaw period  $h_{max\_past}$  for the unit catchment ( $F \leq 1000 \text{ км}^2$ ) (without taking into account the transformation of hydrograph due to slope runoff) for the river basins of the southern megaslope of the East European Plain and West Siberian Lowland: А – during the formation of large rivers, 14–18 ka BP; Б – for modern rivers

с соответствующих климатических карт (Физико-географический..., 1964) сняты среднемесячные температуры воздуха для января и июля.

Современные центры концентрации изученных палеофлор в диапазоне возраста 14–18 тыс. л. н. расположены в межгорных котловинах Алтая и Саян. Использовать напрямую гидрологические характеристики таких районов-аналогов для оценки внутригодовой изменчивости стока больших равнинных палеорек невозможно из-за того, что эти районы-аналоги расположены в горах. На равнинной территории близкие по климатическим характеристикам (зимним и летним температурам воздуха) ландшафты находятся в Большеземельской тундре в бассейне р. Печоры и ее притоков, в бассейне р. Вилюй и на полуострове Ямал. Для бассейна р. Вилюй получены значения параметра внутригодовой неравномерности стока  $Y$  (см. формулу 10) для водосборов с площадью менее 1000 км<sup>2</sup>:

$$Y = \frac{Q_{a\text{ mean}}}{Q_{\text{max}}} = \frac{X_{a\text{ mean}}}{X_{\text{max}}}, \quad (11)$$

которые изменяются от 0.02 до 0.03 (рис. 13). Если к данным табл. 4 применить более консервативное значение, то получим годовой сток больших рек по бассейнам (в км<sup>3</sup>), приведенный в табл. 6.

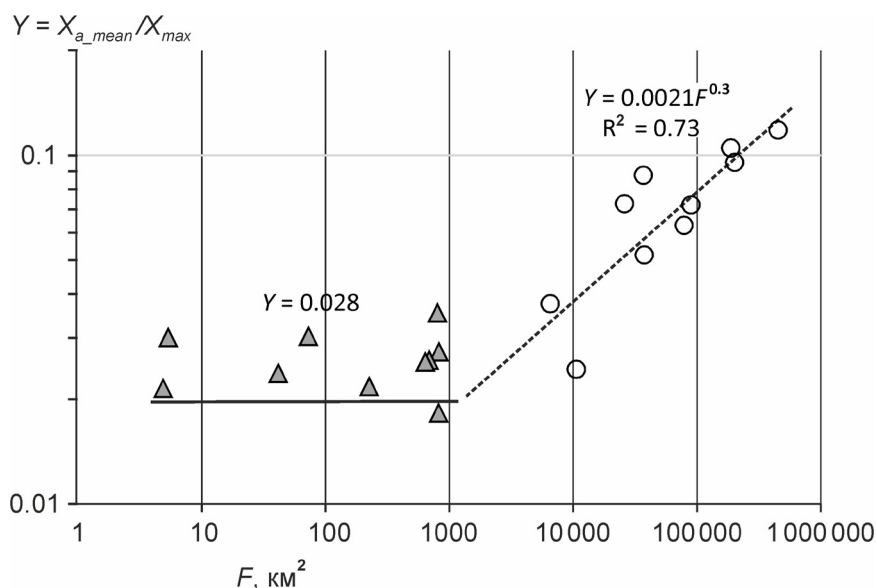
*Территории-аналоги, определенные по данным МОЦАиО.* Принята гипотеза, что значения температуры воздуха, полученные усреднением результатов расчета по набору разных МОЦАиО для этапа 21 тыс. л. н. (Gutiérrez et al., 2021), отражают климат эпохи формирования больших рек. Эта гипотеза базируется на датировках аллювия больших рек (начало дегляциации, около 18 тыс. л. н.) и результатах палеогеографических реконструкций для этого периода. Для выбора аналога реализована следующая процедура. Для каждого узла сетки в 1 градус выбраны ряды рассчитанных среднемесячных температур воздуха с января по июль и проведен поиск соответствия этим рядам по минимуму индекса RMSD (Root Mean Square Deviation) рядов среднемесячных температур воздуха с января по август на 521 метеорологической станции России (Булыгина и др., 2014). Такой поиск привел к до-

**Таблица 5.** Центры современной концентрации видов растений и количественные оценки климатических показателей в районах-аналогах в позднем плейстоцене

**Table 5.** Centers of modern concentration of plant species and quantitatively estimated climatic characteristics of regions-analogues for the late Pleistocene

№	Индексы палеофлор и названия пунктов	Калибр. возраст палеофлор, тыс. л. н.	Координаты места обнаружения палеофлоры		Т воздуха в месте обнаружения палеофлоры		Положение современного района-аналога	Координаты современного района-аналога палеофлоры		Т воздуха в современном районе-аналоге	
			с. ш.	в. д.	T <sub>январь</sub> , °C	T <sub>июль</sub> , °C		с. ш.	в. д.	T <sub>январь</sub> , °C	T <sub>июль</sub> , °C
1	<b>G1</b> Галичское оз.	24	58°30'	42°30'	-13	17.5	Хакасия	54°30'	92°30'	-17	11
2	<b>S1</b> Слобода	21	55°30'	30°30'	-7.5	17.0	Тункинская котловина	51°30'	101°30'	-21.5	9
3	<b>Mг</b> Москва-река	18.5	55°30'	38°30'	-10.5	17.5	низовья р. Чулышман	51°00'	88°00'	-19	12
4	<b>Yu</b> Юдиново	(17.2)*	52°30'	33°30'	-8.5	18.5	верховья р. Катунь	51°00'	87°00'	-16	16.5
5	<b>Ye</b> Елисеевичи	(17.1)	53°00'	34°30'	-8.5	18.5	низовья р. Чулышман	51°00'	88°30'	-17	17.5
6	<b>Sm</b> Сейм_1	16.9	52°00'	35°30'	-8.0	19.5	Тункинская котловина	51°30'	103°00'	-24	16

\* Возраст ПФ, показанный в скобках, получен путем интерполяции между имеющимися радиоуглеродными датировками.



**Рис. 13.** Связь соотношения максимального и среднегодового суточного слоя стока (соответственно  $Y$ ,  $X_{\max}$  и  $X_{a\_mean}$ ) с площадью водосбора  $F$  для рек бассейна р. Вилюй

**Fig. 13.** The relationship between the ratio of the daily maximum and mean annual runoff depth (respectively  $Y$ ,  $X_{\max}$  and  $X_{a\_mean}$ ) and river basin area  $F$  for the rivers of the Vilyuy River basin

**Таблица 6.** Годовой сток древних больших рек  $W_{a\_past}$  по бассейнам, рассчитанный по аналогу в бассейне Вилюя, и сравнение его с современным  $W_{a\_mod}$  ( $F$  – площадь водосбора)

**Table 6.** Annual flow of ancient large rivers  $W_{a\_past}$  by basin, calculated from an analogue in the Vilyuy basin, and its comparison with modern annual flow  $W_{a\_mod}$  ( $F$  – catchment area)

Река	$F$ , тыс. км <sup>2</sup>	$W_{a\_mod}$ , км <sup>3</sup>	$W_{a\_past}$ , км <sup>3</sup>	$W_{a\_past} / W_{a\_mod}$
Волга	1360	254	502	2.0
Дон	422	29	156	5.4
Днепр	504	54	177	3.3
Реки севера Западной Сибири	602	~120	281	2.3
Обь	2630	345	1037	3.0

вольно логичному географическому распределению метеорологических станций – аналогов как для территории южного мегасклона ВЕР (рис. 14А), так и для территории ЗСН (рис. 14Б), места расположения которых являются современными климатическими аналогами соответствующих территорий в эпоху формирования больших рек по температуре воздуха.

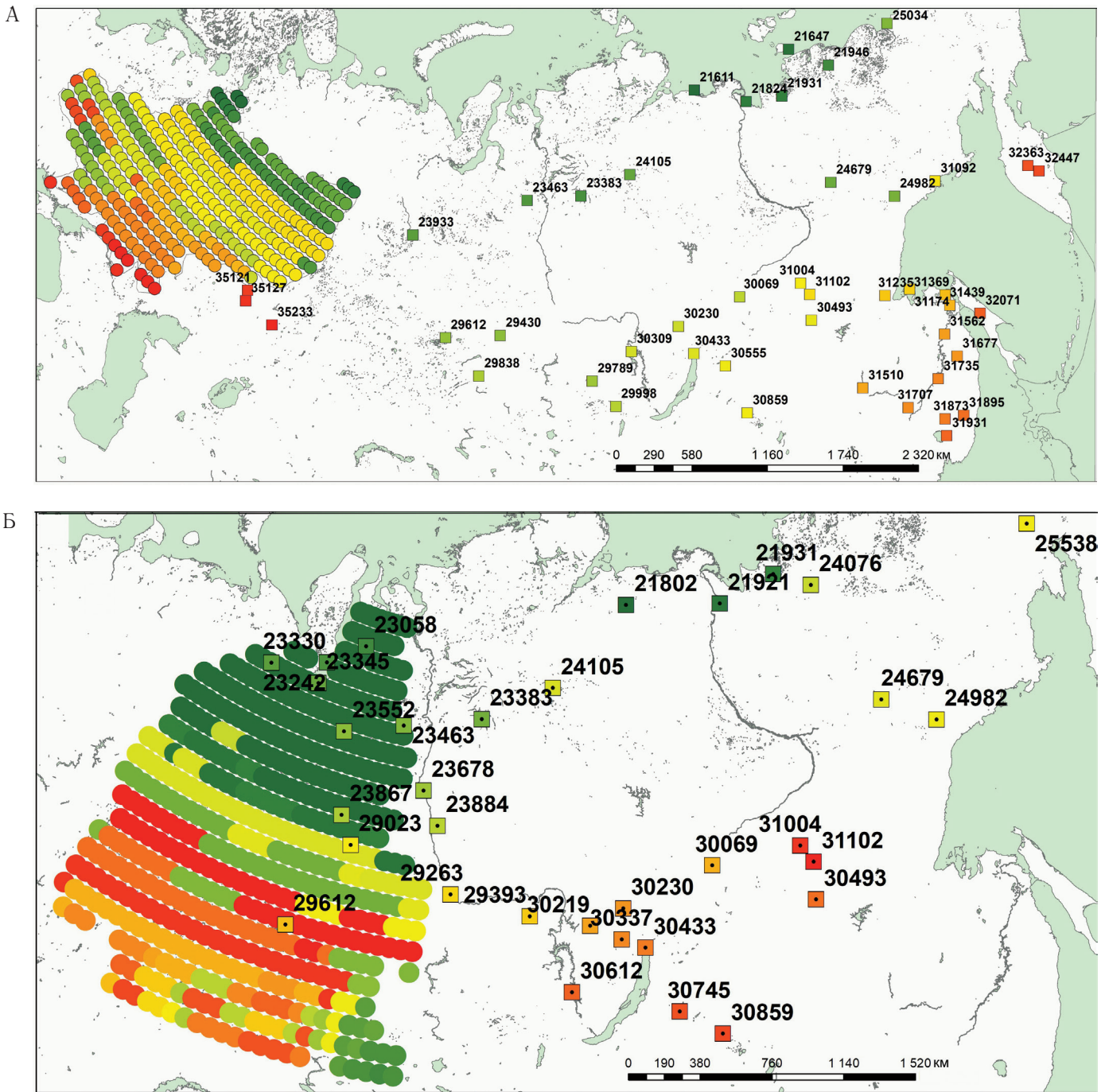
Современным климатическим аналогом территорий на севере бассейна Волги, которые в плейстоцене были заняты тундрами с участием холодоустойчивых ксерофитных сообществ и редколесий, является тундровое побережье Северного Ледовитого океана от низовьев р. Оленек до бухты Амбарчик (станции 21611, 21824, 21931, 21946, 25034, см. расположение станций в табл. 7) и даже арктический о. Шалаурова (станция 21647).

Для севера бассейна Камы в верховьях Колвы современным аналогом является станция Юбилейная (21931) в низовьях Яны. Метеостанции-аналоги для более южных территорий в бассейне р. Москвы

и в верховьях Днепра, где в позднем плейстоцене в тундровой растительности участвовали степные элементы, располагаются в среднегорьях, например, в верховьях Алдана (станции 30493, 31102) и в Забайкалье (станция 30555).

Для территорий перигляциальной лесостепи в бассейне Волги и Камы и в верховьях Дона и Днепра современными климатическими аналогами являются бассейны притоков верхней Лены (Киренга, станция 30230), рек Чара (станция 30069), Алдан (31004) и Тимптон (31102, 30493). Самые западные территории в бассейне Днепра получили аналоги на Дальнем Востоке: на Камчатке (32447), на побережье Охотского моря (31092), в низовьях Амура (31439) и на Сахалине (32041).

Древняя разнотравно-злаковая степь занимала низовья Волги, южную часть бассейна Дона и юго-запад бассейна Днепра. Бассейн Днепра на широте устья Десны получил аналог на средней Оби устья Иртыша (23933), южнее – в верховьях Томи (29430) и Оми (29612), еще южнее, на широте



**Рис. 14.** Современные метеостанции-аналоги (квадраты) для каждого узла сетки МОЦАиО (кружки): А – для территории южного мегасклона ВЕР; Б – для территории ЗСН. Места расположения метеостанций являются современными климатическими аналогами по температуре воздуха для соответствующих территорий в эпоху формирования больших рек. Номера метеостанций соответствуют табл. 7; цвета одинаковы для парных значков метеостанций и узлов сетки

**Fig. 14.** Modern weather stations-analogues (squares) for each AOGCM grid node (circles): А – for the territory of the southern megaslope of the East European Plain; Б – for the territory of the West Siberian Lowland. The locations of the weather stations are modern climatic analogues in air temperatures of the corresponding territories during the period of large rivers' formation. Weather station numbers correspond to Table 7; colours are the same for paired weather stations and grid nodes

**Таблица 7.** Метеостанции-аналоги для реконструкции климата территорий южного мегасклона ВЕР и ЗСН 14–18 тыс. л. н.**Table 7.** Weather stations – analogues for the climate of the territories of the southern megaslope of the East European Plain and Western Siberia 14–18 ka BP

Индекс ВМО	Наименование станции	Координаты станции		Высота метеоплощадки, м н. у. м.	Начало наблюде- ний, год
		широта	долгота		
21611	Терпяй-Тумса	73°33'	118°40'	12	1959
21647	Шалаурова	73°11'	143°14'	21	1928
21802	Саскылах	71°58'	114°05'	16	1935
21824	Тикси	71°35'	128°55'	6	1932
21921	Кюсюр	70°41'	127°24'	30	1909
21931	Юбилейная	70°46'	136°13'	23	1934
21946	Чокурдах	70°37'	147°53'	44	1939
23058	Антипаюта	69°05'	76°51'	2	1961
23242	Новый Порт	67°41'	72°53'	11	1961
23330	Салехард	66°32'	66°40'	15	1961
23345	Ныда	66°37'	72°54'	5	1961
23383	Агата	66°53'	93°28'	277	1971
23463	Янов Стан	65°59'	84°16'	41	1971
23552	Тарко-Сале	64°55'	77°46'	26	1961
23678	Верхнеимбатск	63°09'	87°57'	46	1971
23867	Ларьяк	61°06'	80°15'	55	1961
23884	Бор	61°36'	90°01'	62	1936
23933	Ханты-Мансийск	61°02'	69°07'	44	1962
24076	Депутатский	69°23'	139°53'	281	1961
24105	Ессей	68°28'	102°22'	272	1966
24679	Восточная	63°13'	139°36'	1292	1942
24982	Уега	60°43'	142°47'	396	1961
25034	Бухта Амбарчик	69°37'	162°18'	24	1933
25538	Верхне-Пенжино	64°13'	164°14'	324	1944
29023	Напас	59°51'	81°57'	77	1932
29263	Енисейск	58°27'	92°09'	77	1853
29393	Червянка	57°39'	99°32'	219	1940
29430	Томск	56°30'	84°55'	141	1837
29612	Барабинск	55°20'	78°22'	119	1900
29789	Верхняя Гутара	54°13'	96°58'	983	1935
29838	Барнаул	53°26'	83°31'	183	1838
29998	Орлик	52°30'	99°49'	1376	1934
30069	Перевоз	59°00'	116°55'	330	1937
30219	Максимово	57°06'	104°58'	354	1912
30230	Киренск	57°46'	108°04'	256	1892
30309	Братск	56°17'	101°45'	411	1901

30337	Казачинское	56°19'	107°37'	355	1942
30433	Нижнеангарск	55°47'	109°35'	477	1933
30493	Нагорный	55°57'	124°55'	845	1935
30555	Троицкий Прииск	54°35'	113°09'	1315	1938
30612	Балаганск	54°00'	103°04'	428	1962
30745	Сосново-Озерское	52°32'	111°33'	952	1935
30859	Агинское	51°06'	114°31'	680	1908
31004	Алдан	58°36'	125°23'	678	1926
31092	Талон	59°46'	148°38'	19	1953
31102	Канку	57°39'	125°58'	1204	1950
31174	Большой Шантар	54°50'	137°32'	9	1924
31235	Джана	55°19'	134°33'	318	1952
31369	Николаевск-на-Амуре	53°09'	140°42'	45	1854
31439	Богородское	52°23'	140°28'	33	1935
31510	Благовещенск	50°17'	127°29'	168	1859
31562	Нижнетамбовское	50°55'	138°11'	24	1932
31677	Солекуль	49°10'	138°03'	915	1935
31707	Екатерино-Никольское	47°44'	130°58'	71	1890
31735	Хабаровск	48°31'	135°07'	88	1878
31873	Дальнереченск	45°52'	133°44'	100	1909
31895	Мельничное	45°27'	135°30'	331	1935
31931	Свиягино	44°48'	133°05'	99	1938
32071	Тымовское	50°44'	142°43'	94	1886
32363	Эссо	55°56'	158°42'	480	1941
32447	Долиновка	55°07'	159°04'	101	1936
35121	Оренбург	51°41'	55°06'	115	1843
35127	Акбулак	51°01'	55°38'	143	1927
35233	Домбаровский	50°45'	59°33'	277	1937

устья Орели – в верховьях Оби (29838). Низовья Днепра (в древности сухие степи) имеют современным аналогом среднее течение р. Илек (приток Урала, 35127), протекающей в современных сухих степях. Бассейны нижнего Дона и нижней Волги получили в качестве современного климатического (температурного) аналога места расположения метеостанций в низовьях Амура (31562, 31707, 31735, 31873, 31895, 31931). Только самые низовья Волги и Дона, как и Днепра, имеют современным аналогом бассейн Урала (35121, 35233) в современных сухих степях. Величина RMSD для всех станций, перечисленных выше, довольно низкая (не более 2.3 °C).

Для всей северной части ЗСН (для бассейнов нижней Оби и рек, впадающих в Обскую и Тазовскую губу), расположенной в древней зоне мохово-кустарничковых тундр и березового и ело-

вого редколесья, современным аналогом является средняя часть бассейна р. Анабар (станция 21802) в зоне кустарничковых тундр. Величина RMSD довольно велика (6.5–7.3 °C) на самом севере Западной Сибири (70°30' с. ш.) и линейно уменьшается до 1.5–2 °C к 61°30' с. ш.

Для территории Западной Сибири между 61°30' и 57°30' с. ш. в древней зоне луговых степей с березовыми и еловыми лесами современным климатическим аналогом является полоса кустарничковых тундр и гипоарктических таежных редколесий (северо-восточный кластер I на рис. 6) на востоке от междуречья Яны и Индигирки (станция 24076), низовьев р. Яны (станция 21931) и низовьев Лены (станция 21921) до среднего течения р. Турухан (станция 23463) на западе. При этом чем восточнее расположена метеостанция-аналог, тем севернее

располагается соответствующая территория в Западной Сибири. Величина RMSD в этой области не превышает 1–1.5 °С.

Южнее параллели 57°30' с. ш., в древней зоне полынных степей, современным климатическим аналогом является полоса бореальных таежных редколесий от верховьев Алдана на востоке (станции 30493, 31004, 31102), верховьев Лены (станции 30219, 30230, 30337) и Ангары (станция 30612) в средней части, на Енисее около устья Ангары (станция 29263) и до Барабинской степи (станция 29612) на западе. В основном соблюдается закономерность: чем севернее располагается соответствующая территория в Западной Сибири, тем восточнее или севернее расположена метеостанция-аналог, и чем южнее территория в Западной Сибири, тем западнее или южнее метеостанция-аналог. Величина RMSD здесь не превышает 1–1.8 °С.

Северный кластер метеостанций-аналогов расположен в низовьях Оби (станция 23330), на побережье Обской и Тазовской губы (станции 23058, 23242, 23345) и в среднем течении Пура (станция 23552) в современных зонах кустарничковой тундры и лесотундры. Эта современная территория является аналогом для древней зоны остепненных березовых и сосновых лесов в верховьях Оби. Чем севернее лежит территория в Западной Сибири, тем южнее расположена метеостанция-аналог, так как наиболее суровые климатические условия отмечаются на юге, в горном Алтае. Величина RMSD в этой области не превышает 1 °С.

В целом современным аналогом ландшафтов времени формирования больших рек в основном (за исключением самых южных областей) является область Восточной Сибири с континентальным климатом, вечной мерзлотой, тундровой и таежной растительностью, равнинной на крайнем севере и среднегорной на остальной территории расположения аналогов. Такой климатический аналог, построенный по данным реконструкций температуры воздуха с помощью МОЦАиО, не противоречит палеофлористическим построениям для указанного периода.

Однако нужно подчеркнуть, что территории большинства метеорологических станций могут быть современными аналогами соответствующих территорий в эпоху формирования больших рек только по температуре воздуха. Попытка использовать эти территории как современные аналоги слоя поверхностного стока, снятого с соответствующей карты Национального атласа России (2007), показала отсутствие соответствия между распределением слоя стока по аналогам и слоя максимального стока за половодье, рассчитанного по морфометрии больших палеорусел. Прямые данные МОЦАиО

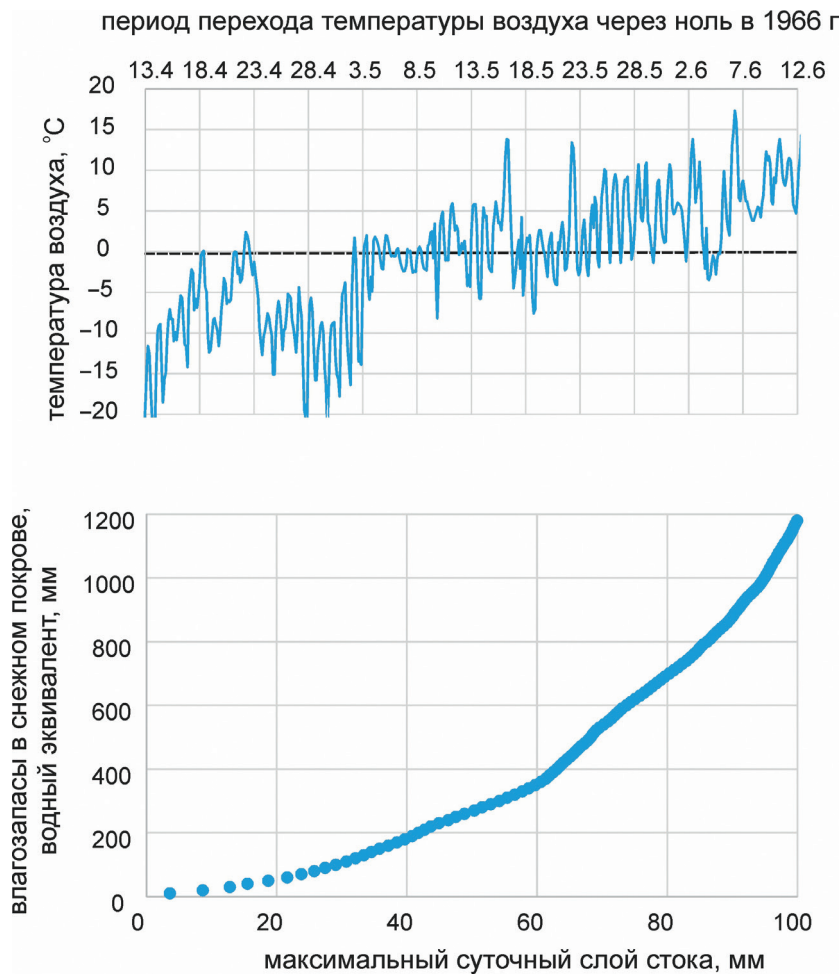
дают общее уменьшение зимних и годовых осадков для южной части ВЕР и для ЗСН для максимума последнего оледенения и в качестве гидрологического аналога использованы быть не могут. Поэтому применено сочетание данных МОЦАиО для поиска аналогов по температуре воздуха, данных о температуре воздуха на метеостанциях-аналогах и данных о максимальном стоке по морфометрии больших древних рек.

*Среднегодовой слой стока, рассчитанный с помощью гидрологической модели.* Для рек в области вечной мерзлоты среднегодовой сток практически равен слою стока весеннего половодья. Для его определения для каждого узла расчетной сетки МОЦАиО южного мегасклона ВЕР и ЗСН имеется ход температуры воздуха для периода снеготаяния по данным метеостанций-аналогов за период 1965–2024 гг. и слой максимального суточного стока  $X_{\max}$ , вычисленный по морфометрии палеорусел и площади речных водосборов. С помощью модели снеготаяния необходимо найти такую величину запасов воды в снеге к началу снеготаяния  $H_{\text{snow}}$ , чтобы для заданного хода температуры воздуха получить заданную величину максимального суточного слоя стока  $X_{\max}$ , среднюю за период расчета.

Осуществимость такой процедуры была показана для одной метеостанции-аналога в (Сидорчук и др., 2023). Была использована упрощенная модель снеготаяния (Matveeva, Sidorchuk, 2020), являющаяся синтезом моделей В.Л. Комарова (1961) и Ю.Б. Виноградова (1983). Модель была калибрована по данным измерений на полуострове Ямал, в первую очередь уточнялись значения коэффициента стаивания и характер неравномерного распределения снега по водосбору.

В настоящей работе расчеты выполнены для 65 метеостанций-аналогов для перигляциальной зоны ВЕР и ЗСН (некоторые станции повторяются на разных территориях). В ходе расчетов для каждой станции получена зависимость между  $X_{\max}$  и  $H_{\text{snow}}$  (рис. 15). Все зависимости нелинейны, производная  $dH_{\text{snow}}/dX_{\max}$  увеличивается с увеличением  $X_{\max}$ .

По этим зависимостям для каждой станции-аналога определялись величины  $H_{\text{snow}}$  для каждого узла расчетной сетки МОЦАиО южного мегасклона ВЕР и ЗСН, после чего, исходя из предположения, что потери стока на инфильтрацию незначительны и запасы воды в снеге равны слою стока за половодье (что для рек в зоне вечной мерзлоты практически равносильно характеристикам среднегодового стока  $X_{\text{mean}_a}$ ), строились карты распределения  $X_{\text{mean}_a}$  по территории (рис. 16А) и оценивались средние и предельные величины для крупных речных бассейнов (табл. 8).



**Рис. 15.** Расчеты по модели снеготаяния (Matveeva, Sidorchuk, 2020) для метеостанции Канку (№ 31102): А – ход температуры воздуха для периода снеготаяния в 1966 г., Б – максимальный суточный слой стока талых вод при разных расчетных величинах запасов воды в снеге

**Fig. 15.** Calculations based on the snow thaw model (Matveeva, Sidorchuk, 2020) for the Kanku weather station (No. 31102): A – variation of air temperature for the snow thaw period in 1966, Б – maximum daily melt water runoff depth at different given values of water equivalent in snow

**Таблица 8.** Характеристики годового стока древних больших рек  $W_{a\_past}$ , рассчитанные по сетке МОЦАиО ( $F$  – площадь водосбора,  $X_{mean\_a}$  – среднегодовой слой стока)

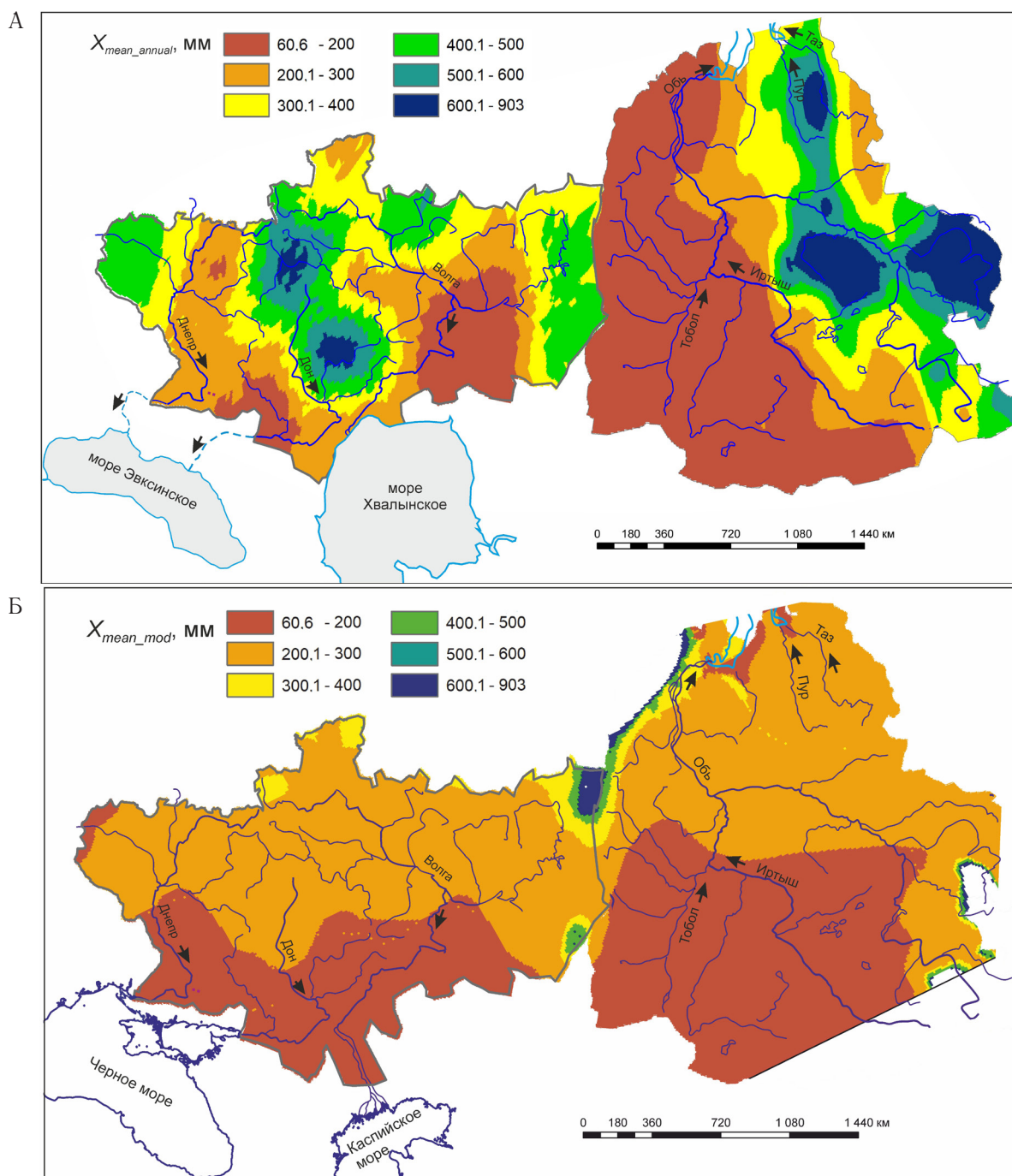
**Table 8.** Annual flow of ancient large rivers  $W_{a\_past}$  by basin, calculated from the Atmosphere-Ocean General Circulation Model (AOGCM) grid ( $F$  – catchment area,  $X_{mean\_a}$  – mean annual runoff depth)

Река	$F$ , тыс. км <sup>2</sup>	$W_{a\_mod}$ , км <sup>3</sup>	$X_{mean\_a}$ , мм	$\sigma$ , мм	$C_v$	$W_{a\_past}$ , км <sup>3</sup>	$W_{a\_past} / W_{a\_mod}$
Волга	1360	254	327.2	122.8	0.38	445.0	1.8
Дон	422	29	350.7	145.4	0.41	148.0	5.1
Днепр	504	54	320	80.8	0.25	161.3	3.0
Реки севера Западной Сибири	602	~120	387.1	112.8	0.29	233.0	~2
Обь	2630	345	273.4	198.8	0.73	719.0	2.1

**Пространственное распределение среднегодового слоя стока по площади бассейнов**

Карта среднегодового стока в период формирования древних рек в основных чертах повторяет карту распределения суточного максимального слоя стока: на ней видны те же общие меридиональ-

ные и широтные градиенты, а также орографические эффекты. В Западной Сибири более отчетливо выражена широтная неравномерность стока в древности (большой сток на востоке низменности и малый – на западе) при общем уменьшении стока с севера на юг. По сравнению с современным распределением слоя годового стока по этим террито-



**Рис. 16.** Распределение среднегодового слоя стока для бассейнов рек южного мегасклона ВЕР и ЗСН: А – в период формирования больших рек, 14–18 тыс. л. н., Б – для современных рек

**Fig. 16.** Distribution of the mean annual runoff depth for the river basins of the southern megaslope of the East European Plain and the West Siberian Lowland: A – during the formation of large rivers, 14–18 ka BP, Б – for modern rivers

риям (рис. 16Б), где главной тенденцией является уменьшение стока с севера на юг, в древности это распределение было более разнообразным, с более ярко выраженной широтной дифференциацией и влиянием орографии.

В зависимости от величин параметров, входящих в гидрологическую модель, рассчитанные значения среднегодового слоя и объема стока будут варьировать. Так, если принять коэффициент ставивания равным 5 мм/град, а не 6.5, как принято в

калиброванной модели, то необходимый запас воды в снеге для получения того же максимального слоя стока будет больше примерно на 20%, что приведет к соответствующему увеличению рассчитанных значений в табл. 8. Не меньшее влияние оказывают вариации неравномерности пространственного распределения снежного покрова. Так, если весь снег в период снеготаяния «переместить» в овраги, необходимый запас воды в снеге для получения того же максимального слоя стока будет больше примерно на 30%.

**ОБСУЖДЕНИЕ МЕТОДОВ И РЕЗУЛЬТАТОВ**

Современные меандрирующие реки являются аналогами больших меандрирующих палеорек. Это доказывает близость как функций распределения вероятностей, так и средних величин отношения шага излучин к ширине для современных и древних меандрирующих русел. Самоподобие плановых очертаний меандрирующих русел, наличие закономерных изменений формы живого сечения по длине реки, обусловленное определенной гидродинамической структурой потока, делают меандрирующие реки хорошими объектами для применения метода актуализма и позволяют использовать результаты наблюдений на современных реках для восстановления условий формирования древних рек.

**Анализ связи ширины русла и расходов воды**

В рамках метода актуализма главной является гипотеза о том, что для палеогидрологических реконструкций возможно использование морфометрических связей между максимальным расходом воды и шириной русла на уровне руслонаполнения (формулы 4 и 5), полученных для современных рек. Применение морфометрических связей обосновано

в большом количестве работ, главными из которых являются работы Леопольда и Маддока (Leopold, Maddock, 1953) и М.А. Великанова (1958). Простейшие морфометрические связи, введенные в практику расчетов Леопольдом и Маддоком (Leopold, Maddock, 1953), связывают основные гидравлические характеристики потока (скорость  $U$ , ширину  $W$  и глубину  $d$ ) с расходом воды  $Q$  степенными зависимостями, примером которых является зависимость (4).

$$U = a_U Q^{b_U}, \tag{12}$$

$$W = a_W Q^{b_W}, \tag{13}$$

$$d = a_d Q^{b_d}. \tag{14}$$

Система этих зависимостей не замкнута, так как для их замыкания возможно только применить формулу для расчета расхода воды:

$$Q = UWd, \tag{15}$$

и, с определенными оговорками, формулу Шези – Маннинга с учетом уклона  $S$  и коэффициента шероховатости  $n$ :

$$U = \frac{\sqrt{S}}{n} d^{2/3}. \tag{16}$$

Возможности добавления к перечисленным зависимостям дополнительных связей (см., например, (Михайлов и др., 1986)) трудно реализовать при палеогидрологических реконструкциях из-за отсутствия необходимых данных. В результате возникает неопределенность в установлении коэффициента  $a$  и показателя степени  $b$  в формуле (5), которые можно выразить разными способами с помощью формул (12) – (16), например:

$$Q = UWd = a_U Q^{b_U} a_d Q^{b_d} W = (a_U a_d)^{\frac{1}{1-b_U-b_d}} W^{\frac{1}{1-b_U-b_d}} \tag{17}$$

$$Q = UWd = U \frac{d}{W} W^2 = a_U Q^{b_U} \frac{a_d Q^{b_d}}{a_W Q^{b_W}} W^2 = (a_U \frac{a_d}{a_W})^{\frac{1}{1+b_W-b_U-b_d}} W^{\frac{2}{1+b_W-b_U-b_d}} \tag{18}$$

$$Q = UWd = \frac{\sqrt{S}}{n} d^{5/3} W = (a_d Q^{b_d})^{5/3} \frac{\sqrt{S}}{n} W = \left[ (a_d)^{5/3} \frac{\sqrt{S}}{n} \right]^{\frac{3}{3-5b_d}} W^{\frac{3}{3-5b_d}} \tag{19}$$

и тому подобное.

Во всех случаях показатель степени  $b$  в формуле (5) выражается через то или иное сочетание показателей степени в формулах (12) – (14). Эмпирические данные показывают, что для крупных рек эти сочетания приводят к довольно стабильным средним значениям показателя степени  $b$  в формуле (5) в диапазоне 1.28–1.42 с коэффициентами вариации в диапазоне 0.04–0.12. Значение  $b = 1.37$  в формуле (5) соответствует значению показателя степени в формуле (13) для крупных рек  $b_W = 0.72$ , что дополняет ряд значений, полученный в (Nachtergaele et al., 2002) для эрозионных и русловых форм разных размеров:  $b_W = 0.3$  для эрозионных борозд на склонах,  $b_W = 0.4$  для оврагов и  $b_W = 0.5$  для малых рек.

Коэффициент  $a$  в формуле (5) выражается как через сочетание показателей степени в формулах (12) – (14), так и через сочетание коэффициентов в этих формулах, а с учетом формулы Шези – Маннинга зависит также от уклона реки и гидравлических сопротивлений. Эмпирические данные подтверждают эту более сложную структуру коэффициента  $a$  и его пространственную вариабельность как между разными речными бассейнами, так и внутри одного бассейна. В среднем для рек ВЕР коэффициент  $a$  вдвое больше, чем для рек ЗСН в области вечной мерзлоты, т. е. ширина русел в среднем вдвое меньше при одинаковых максимальных расходах воды. Этот эффект, вероятнее всего, связан с большими уклонами рек (как современных, так и древних) южного мегасклона ВЕР по сравнению с реками Западной Сибири, а также с протеканием многих современных рек южного мегасклона ВЕР по широким унаследованным поймам и с уменьшением руслонаполняющих расходов воды по сравнению с реками севера ЗСН с относительно узкими поймами (не считая таких рек, как нижняя Обь, низовья Таза и Пура).

Таким образом, теоретические и эмпирические данные подтверждают относительную стабильность показателя степени  $b$  в формуле (5) для крупных рек и возможность использования единого его значения, полученного для современных рек, для палеогидрологических реконструкций. Теоретический анализ подтверждает эмпирические данные о большой пространственной изменчивости коэффициента  $a$  в формуле (5), поэтому его значения принимаются при палеогидрологических реконструкциях разными для разных речных бассейнов.

Было показано (Сидорчук и др., 2021; Sidorchuk, 2023), что морфометрическая зависимость (5) связывает ширину реки при уровне руслонаполнения именно со среднемаксимальным расходом воды. Для этого был проведен анализ зависимостей (4) и (5) для бассейнов рек с разным гидрологическим режимом, протекающих в самых разных природных

условиях — в современной зоне вечной мерзлоты (р. Лена) и в области экваториальных лесов (р. Амазонка), а также для древних рек, для которых расходы воды были вычислены по уравнениям гидравлики (Сидорчук и др., 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, таких как Лена и Амазонка. Если же в зависимостях (4) и (5) использовать средний годовой расход воды, то единой связи не получается (см. рис. 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 измеренной ширине палеорусел можно непосредственно получить только эти среднемаксимальные расходы.

### ***Анализ связи между расходом на максимуме половодья и площадью водосбора***

Рассмотрим возможность приведения среднемаксимальных расходов воды в палеореках к элементарному водосбору с помощью степенных связей типа (7) – (9). Применение этих связей возможно только исходя из гипотезы, что сток в древних реках формировался при поступлении воды на водосбор за счет атмосферных осадков в твердом или жидком виде. Гипотеза о формировании больших русел за счет стока вод тающего материкового ледника в позднем плейстоцене — позднеледниковье не имеет фактического обоснования и не соответствует имеющимся палеогеографическим данным (Панин и др., 2021).

Связи между расходом воды на максимуме половодья и площадью водосбора давно вошли в арсенал методов гидрологических расчетов, однако вопрос об изменении величины коэффициента редукции в формуле (7) по мере изменения площади водосбора в литературе освещен слабо. В.М. Евстигнеев (1990) отмечает, что для малых водосборов отмечается замедление редукции; в некоторых региональных работах показано отсутствие изменения модуля стока по мере изменения площади водосбора на малых водосборах (Новиков, 2009). Нами принята площадь элементарного водосбора 1000 км<sup>2</sup>: на водосборах большей площади происходит редукция максимальных расходов воды, а на водосборах с меньшей площадью редукция отсутствует, и коэффициент редукции равен нулю. Эмпирические данные по бассейнам современных рек ВЕР показывают, что на многих реках такая схема применима, хотя и не универсальна.

К этому же вопросу примыкает проблема различий в значениях коэффициента редукиции максимальных расходов воды для современных и древних рек в одном и том же бассейне. Как уже отмечалось, для бассейнов Волги и Днепра изменение ширины русла по мере изменения площади водосбора различается для современных и древних рек. Для современных рек показатели степени  $q$  в функциях  $W = pF^q$  составляют 0.47 для бассейнов и Волги, и Днепра, тогда как для древних рек показатели степени  $q$  составляют 0.37 для бассейна Волги и 0.32 для бассейна Днепра. Это означает, что коэффициенты редукиции максимальных расходов воды для древних рек, рассчитанные по формуле (5), примерно на 80% больше, чем для современных. Причины этого явления не вполне ясны и предположительно могут быть связаны с недостаточной развитостью высокой поймы некоторых больших древних рек и с уменьшением соотношения руслонаполняющего и среднегодового расхода воды по длине этих рек.

**Сравнение с обобщенным эмпирическим методом палеогидрологических расчетов**

Палеогидрологические расчеты для рек ВЕР и ЗСН проводились нами и ранее (Сидорчук и др., 2008, 2018). Применялся полностью эмпирический метод, основанный на зависимости между шириной русла при уровне руслонаполнения и средним годовым расходом воды  $Q_{mean}$ :

$$Q_{mean} = 0.012 y^{0.73} W^{1.36}. \quad (20)$$

Здесь

$$y = 100 \frac{Q_{mean}}{Q_{max}} = aF^{0.125}, \quad (21)$$

т. е.

$$Q_{mean} = k_1 F^{0.09} W^{1.136} \quad (22)$$

Зависимость (20) была получена путем обработки данных более чем по 450 гидрологическим станциям в широком диапазоне ландшафтов от тундры до сухих степей (Сидорчук и др., 2008).

Если принять, что

$$\frac{Q_{mean}}{Q_{max}} \approx F^{0.09}, \quad (23)$$

то формула (22) преобразуется в формулу (5), а формула (23) служит переходом от максимального стока к среднегодовому по принципу, заложенному в формулу (10). Таким образом, изложенный выше метод палеогидрологических реконструкций не противоречит эмпирическому подходу, примененному в указанных публикациях, а является

его развитием. Главным отличием обобщенной эмпирической формулы от описанных выше является существенное осреднение коэффициентов и нарушение логичной последовательности расчетов при палеогидрологических реконструкциях. Предлагаемый более явный способ расчета палеогидрологических характеристик эти недостатки прежнего подхода устраняет.

**Анализ результатов проведенных расчетов**

Среднемаксимальные расходы воды в древних реках были рассчитаны на основе морфометрических связей для современных рек и измеренной ширины древних рек; суточный максимальный слой стока  $X_{max\_past}$  был приведен к элементарному водосбору, и построены карты пространственных изменений  $X_{max\_past}$  в бассейнах рек южного мегаеклона ВЕР и ЗСН. Построение такой карты требует достоверности еще одной гипотезы — о синхронности формирования больших меандрирующих палеорусел на этой территории. Эта гипотеза базируется на имеющихся датировках аллювия палеорек, которые не образуют территориальных кластеров с разным возрастом палеорусел. Даты формирования руслового аллювия распределены довольно равномерно, в первую очередь по бассейну Волги, где имеется наибольшее количество датировок (Украинцев и др., 2024). В то же время палеофлористические реконструкции климата ВЕР дают основание для выделения двух главных периодов формирования больших палеорусел: так называемый раунисский интерстадиал с максимумом около 18 тыс. л. н. и переход от древнейшего дриаса к бёллингу около 15 тыс. л. н. (Борисова, 2021; Vanderberghe, Sidorchuk, 2019). Вероятная асинхронность образования больших рек в разных частях рассматриваемой обширной территории является еще одним фактором пространственной неравномерности рассчитанного стока.

Рассчитанная средняя по бассейнам рек величина максимального суточного слоя стока при снеготаянии составляла 50–65 мм/сут, что в 6–10 раз больше соответствующего современного показателя. Современным аналогом таких характеристик стока вод половодья является, например, скованная вечной мерзлотой территория полуострова Ямал, где средний по территории слой максимальной суточной водоотдачи для периода половодья составляет 50–55 мм/сут (Matveeva, Sidorchuk, 2020). Для всех рек севера Западной Сибири отличия от современного соответствующего показателя в среднем составили не 6–10, а 2.3 раза (см. табл. 6). Это объясняется значительными запасами воды в снеге к началу весны, накопленными за длинную

зиму, и малыми потерями стока на испарение и инфильтрацию в криолитозоне.

*Переход от суточного максимального слоя стока к среднегодовому* потребовал формулирования новых гипотез, подлежащих обсуждению.

Во-первых, предполагается, что сток воды за год и сток за период половодья примерно равны. Это предположение основано на реконструкциях растительности равнин Северной Евразии для времени от максимума последнего оледенения до позднеледниковья. В этой растительности (см. рис. 1) обычно присутствуют или даже доминируют степные засухоустойчивые элементы, что говорит о сухом климате. Объяснить засухоустойчивую растительность на водосборах многоводных рек можно предположением о резкой сезонности поступления атмосферных осадков на эти водосборы. Если в условиях перигляциального климата осадки в виде снега поступали на поверхность речных водосборов во время продолжительной зимы, весеннее снеготаяние было непродолжительным и интенсивным, половодье коротким с высоким максимумом, а летом осадков было мало, и в межень сток вод из толщи вечномёрзлых грунтов был незначительным, то утверждения о ксерофильности растительности и многоводности рек не вступают в противоречие. Современными аналогами такой совокупности природных условий являются бассейны практически всех рек области развития вечной мерзлоты, включая такие крупные реки, как Лена. Во время половодья расход воды в Лене у водпоста Кюсюр достигает  $165\,000\text{ м}^3/\text{с}$ , а во время зимней межени уменьшается до  $600\text{--}700\text{ м}^3/\text{с}$ , т. е. русло этой огромной реки становится практически пустым.

Во-вторых, при использовании формулы (10) или (11) для расчета среднегодового расхода воды (или расхода для среднего половодья) предполагается наличие современного гидрологического аналога для бассейна древней реки с устойчивым соотношением  $Y$  среднегодового и среднемаксимального расходов воды, чтобы можно было перенести это соотношение с аналога на древнюю реку. Использование палеофлористического метода показывает, что прямые гидрологические аналоги для древних равнинных рек найти невозможно, поскольку все современные районы-аналоги для палеофлор расположены в горах. Возможности для поиска приблизительного гидрологического аналога на равнине на основе представлений о составе палеорастительности довольно ограничены — в зоне вечной мерзлоты это только Якутская низменность и с меньшей вероятностью также полуостров Ямал и Большеземельская тундра. Как показывает рис. 14, даже при условии, что аналог выбран пра-

вильно, значение  $Y$  для элементарных водосборов варьирует в 1.5 раза, определяя соответствующую ошибку в оценке среднегодового стока.

В-третьих, предполагается, что результаты моделирования климата с помощью МОЦАиО для максимума последнего оледенения адекватно воспроизводят среднемесячные температуры воздуха на период формирования больших древних меандрирующих рек. Это предположение основано на сходстве температурных условий максимума последнего оледенения и конца плейстоцена, реконструированных по палеофлористическим данным (см. табл. 5). Такое предположение дает возможность хотя бы приблизительно найти аналоги палеоклимата в записях современных метеостанций и применить гидрологическую модель снеготаяния для оценки слоя стока половодья в палеореках. Эта процедура приводит к построению карты слоя стока половодья, приравненного к среднегодовому слою стока, и оценке годового объема стока главных рек ВЕР и ЗСН. Варьирование параметров, входящих даже в упрощенную гидрологическую модель, приводит к возможным изменениям значений на этой карте в пределах 20–30%.

Точность палеогидрологических расчетов невелика, так как велика вариабельность параметров, входящих в главные расчетные формулы. Оценки с разбросом значений в 1.5 раза обычны. Палеогидрологические реконструкции можно считать достоверными только для территорий и периодов времени с существенными отличиями размеров палеорусел от современных русел. Это условие соблюдается для бассейнов рек южного мегасклона ВЕР и ЗСН, так как в этих регионах ширина палеорусел в 3–10 раз больше современных при тех же площадях водосборов.

Несмотря на невысокую точность палеогидрологических оценок, не вызывает сомнения существование большого максимального и годового стока рек в конце плейстоцена — начале позднеледникового времени. Это требует существенных уточнений в существующей общепринятой климатической модели постгляциального времени, основанной на реконструкциях растительности, изменения устойчивого мнения об общей сухости климата конца последнего оледенения и об отсутствии атмосферных осадков, достаточных для формирования этого большого речного стока.

*Аномально высокий сток в бассейне Дона.* Показатели максимального и среднегодового стока, реконструированные для бассейна р. Хопер, притока Дона, выглядят как аномалия на картах (рис. 12 и 16), и отношение древнего годового стока к современному в бассейне р. Дон существенно

больше, чем в других бассейнах (см. табл. 6 и 8). Палеоруслу в бассейне р. Хопер хорошо исследованы (Sidorchuk, Vorisova, 2000; Панин и др., 2013; Матлахова, 2021), поэтому нет сомнений в наличии здесь древних русел больших размеров, которые формировались большим стоком воды. Возможно, эти палеоруслу относятся к самому началу врезания русла р. Дон при увеличении стока воды, и поэтому их морфология отличается от морфологии более молодых и глубже врезанных палеорусел.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования палеорек в бассейнах рек южного мегасклона ВЕР и ЗСН позволяют сделать следующие выводы.

1. Морфология меандрирующих рек самоподобна: при изменении масштаба соотношение главных морфологических элементов (ширины русел, шага излучин, формы живого сечения) или не меняется, или меняется закономерным образом. Следовательно, современные меандрирующие русла можно рассматривать как аналоги больших меандрирующих палеорусел и использовать морфометрические зависимости, выведенные для современных рек, для палеогидрологических реконструкций.

2. Рассчитанная по морфометрическим зависимостям средняя по бассейнам рек величина максимального суточного слоя стока при снеготаянии составляла 50–65 мм/сут, что в 6–10 раз больше соответствующего современного показателя (за исключением рек севера Западной Сибири, где это различие составило 2.3 раза). Пространственное распределение максимального слоя стока показывает, что поток влаги на ВЕР шел преимущественно с северо-запада на юго-восток, а на ЗСН — с северо-востока на юго-запад.

3. Очень большие величины слоя максимальной суточной водоотдачи на малых водосборах во время снеготаяния предполагают наличие на равнинах Северной Евразии в конце плейстоцена — начале позднеледниковья значительных запасов воды в снеге к началу весны и дружного весеннего снеготаяния. Расчеты на основании гидрологической и климатической аналогии показали, что в среднем для этой территории площадью 5.52 млн км<sup>2</sup> запасы воды в снеге перед началом снеготаяния составляли 309–390 мм, а объем стока за половодье, принимаемый близким к годовому объему стока, — 1706–2150 км<sup>3</sup>, что в 2.1–2.7 раза больше современного.

4. Реконструкция большого максимального и годового стока рек в конце плейстоцена — начале позднеледниковья требует существенных уточнений в существующей общепринятой климатической

модели постгляциального времени, основанной на реконструкциях растительности, изменения устоявшегося мнения об общей сухости климата конца последнего оледенения и об отсутствии атмосферных осадков, достаточных для формирования большого речного стока.

5. Если принять, что в условиях перигляциального климата существовала резкая сезонность внутригодового распределения осадков, атмосферные осадки в виде снега поступали на поверхность речных водосборов во время продолжительной зимы, весеннее снеготаяние было дружным и интенсивным, половодье коротким с высоким максимумом, а летом осадков было мало и сток вод межени из толщи вечномерзлых грунтов был незначительным, то реконструкции ксерофитной растительности, с одной стороны, и многоводных рек, с другой стороны, не вступают в противоречие.

6. Наличие существенного зимнего поступления осадков в конце плейстоцена — начале позднеледниковья с хорошо выраженным сокращением с запада на восток на Восточно-Европейской равнине и с северо-востока на юго-запад в Западной Сибири требует построения соответствующей модели циркуляции атмосферы, положения климатических фронтов и распределения температуры воздуха и осадков по территории в зимнее время.

## 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

Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТТ). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942 от 2 июля 2014 г.

Былинский Е.Н., Востоков Е.Н. Главный водораздел Русской равнины, его тектоническая природа и гляциоизостатический механизм формирования // Геоморфология. 1976. № 3. С. 26–37.

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

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

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

- 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: Изд-во ГГИ, 2020. 262 с.
- Глушков В.Г. Географический и гидрологический метод // Изв. ГГИ. 1933. Т. 57. С. 89–95.
- 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 130 000 лет. Атлас-монография / А.А. Величко (отв. ред.). 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.
- Зольников И.Д., Филатов Е.А., Шпанский А.В. и др. Геологические свидетельства суперпаводков в Верхнем Приобье // Геоморфология и палеогеография. 2024. Т. 55. № 4. С. 13–25.  
DOI: 10.31857/S2949178924040023
- Зыкина В.С., Волков И.А., Дергачева М.И. Верхнечетвертичные отложения и ископаемые почвы Новосибирского Приобья. М.: Наука, 1981. 203 с.
- Комаров В.Д. Весенний сток равнинных рек европейской части СССР, условия его формирования и методы прогнозов. М.: Гидрометеиздат, 1959. 296 с.
- Маккавеев Н.И. (ред.) Проектирование судовых ходов на свободных реках. М.: Транспорт, 1964. 263 с.
- Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 346 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 / Н.И. Маккавеев (ред.). 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.
- Михайлов В.Н., Рогов М.М., Чистяков А.А. Речные дельты. Гидролого-морфологические процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 279 с.
- Национальный атлас России: в 4 т. Т. 2. Природа. Экология. М.: Роскартография, 2007. 495 с.
- 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.
- Новиков С.М. (ред.) Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири. СПб: ВВМ, 2009. 536 с.
- Обедиентова Г.В. Эрозионные циклы и формирование долины Волги. М.: Наука, 1977. 240 с.
- 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., Баслеров С.В., Борисова О.К., Ковалюх Н.Н., Шеремецкая Е.Д. Основные этапы истории речных долин центра Русской равнины в позднем Валдае и голоцене: результаты исследований в среднем течении р. Сейм // Геоморфология. 2001. № 2. С. 19–34.
- 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.
- Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Украинцев В.Ю. Вклад талых ледниковых вод в формирование стока Волги в последнюю ледниковую эпоху // Водные ресурсы. 2021. Т. 48, № 6. С. 656–663.
- Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Чернов А.В. Макроизлучины рек ЕТС и проблемы палеогидрологических реконструкций // Водные ресурсы. 1992. Т. 19. № 4. С. 93–97.
- Ромашин В.В. Типы руслового процесса в связи с определяющими факторами // Труды ГГИ. Вып. 155. Л.: Гидрометеиздат, 1968. С. 56–63.
- Сидорчук А.Ю. Унаследованные поймы и седиментационный режим в пойменно-русловых комплексах // Геоморфология. 2014. № 3. С. 112–120.
- Сидорчук А.Ю., Борисова О.К., Панин А.В. Палеогидрология рек бассейна реки Дон // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2023. Т. 5. № 2. С. 172–190.
- Сидорчук А.Ю., Борисова О.К., Панин А.В. Поздневалдайские палеоруслы рек Русской равнины // Известия РАН. Серия географическая. 2000. № 6. С. 73–78.
- 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
- Украинцев В.Ю. Поздневалдайские палеоруслы рек бассейна Волги: условия формирования, возраст, палеогеографическое значение: дис. ... канд. геогр. наук по специальности 1.6.14 – Геоморфология и палеогеография. 2023.
- Украинцев В.Ю., Зазовская Э.П., Захаров А.Л., Максимов Ф.Е., Петров А.Ю. О времени проявления эпохи обильного речного стока в бассейне Волги // Водные ресурсы. 2024. Т. 51. № 3. С. 235–243.
- Физико-географический атлас мира. М.: Институт географии АН СССР и ГУГК, 1964. 300 с.
- Хруцкий С.В., Смольянинов В.М., Косцова Э.В. Альбом геологических разрезов центрально-черноземных областей. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1974. 176 с.
- Чалов Р.С. О классификации речных русел // Геоморфология. 1980. № 1. С. 3–16.
- Blom A., Arkesteijn L., Chavarrias Borrás V., Viparelli E. The equilibrium alluvial river under variable flow and its channel-forming discharge // Journal of Geophysical Research. Earth Surface. 2017. Vol. 122. P. 1924–1948. DOI: 10.1002/2017JF004213.
- Borisova O.K., Sidorchuk A.Yu., Panin A.V. Palaeohydrology of the Seim River basin, Mid-Russian Upland, based on palaeochannel morphology and palynological data // Catena 2006. Vol. 66. P. 53–78.
- Borsy Z., Felegyhazi E. Evolution of the network of water courses in the northeastern part of the Great Hungarian Plain from the end of the Pleistocene to our days // Quaternary Studies in Poland. 1983. Vol. 4. P. 115–124.
- Dury G.H. Contribution to a general theory of meandering valleys // American Journal of Science. 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
- Gábris G., Nádor A. Long-term fluvial archives in Hungary: response of the Danube and Tisza rivers to tectonic movements and climatic changes during the Quaternary: a review and new synthesis // Quaternary Science Reviews. 2007. Vol. 26. P. 2758–2782.
- Gelfan A., Panin A., Kalugin A., Morozova P., Semenov V., Sidorchuk A., Ukraintsev V., Ushakov K. Hydroclimatic processes as the primary drivers of the Early Khvalynian transgression of the Caspian Sea: new developments // Hydrology and Earth System Science. 2024. Vol. 28. P. 241–259.
- Gutiérrez J.M., Jones R.G., Narisma G.T., Alves L.M., Amjad M., Gorodetskaya I.V., Grose M., Klutse N.A.B., Krakovska S., Li J., Martínez-Castro D., Mearns L.O., Mernild S.H., Ngo-Duc T., van den Hurk B., Yoon J.-H. Atlas // Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / V. Masson-Delmotte, P. Zhai et al. (Eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021. P. 1927–2058.  
DOI: 10.1017/9781009157896.021.
- Howard A.J., Macklin M.G., Bailey D.W., Mills S., Andreescu R. Late-glacial and Holocene river development in the Teleorman Valley on the southern Romanian Plain // Journal of Quaternary Science. 2004. Vol. 19. P. 271–280.
- Inglis C.C. Meanders and their bearing on river training // Institution of Civil Engineers. Maritime and Waterways engineering Division. 1947. Vol. 7. P. 3–54.
- Kapsch M.-L., Mikolajewicz U., Ziemer F., Schanwell C. Ocean response in transient simulations of the last deglaciation dominated by underlying ice-sheet reconstruction and method of meltwater distribution // Geophysical Research Letters. 2022. Vol. 49, e2021GL096767. DOI: 10.1029/2021GL096767
- Kozarski S., Rotnicki K. Valley floors and changes of river channel patterns in the north Polish Plain during the Late-Würm and Holocene // Quaestiones Geographicae. 1977. Vol. 4. P. 51–93.
- Kremenetski C.V., Böttger T., Junge F.W., Tarasov A.G. Late- and postglacial environment of the Buzuluk area, middle Volga region, Russia // Quaternary Science Reviews. 1999. Vol. 18. P. 1185–1203.
- Leopold L.B., Maddock T. The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications // US Geological Survey Professional Paper. Washington, DC, USA: United States Government Printing Office. 1953. Vol. 252. 57 p.
- Leopold L.B., Wolman M.G. River Meanders // Bulletin of the Geological Society of America. 1960. Vol. 71. P. 769–794.
- Matoshko A., Gozhik P., Ivchenko A.S. The fluvial archive of the Middle and Lower Dnieper (a review) // Netherlands Journal of Geosciences. 2002. Vol. 81. P. 339–355. DOI: 10.1017/S0016774600022642

Matveeva T., Sidorchuk A. Modelling of Surface Runoff on the Yamal Peninsula, Russia, Using ERA5 Reanalysis // *Water*. 2020. Vol. 12. Paper 2099.

DOI: 10.3390/W12082099

Nachtergaele J., Poesen J., Sidorchuk A., Torri D. Prediction of concentrated flow width in ephemeral gully channels // *Hydrological Processes*. 2002. Vol. 16(10). P. 1935–1953. DOI: 10.1002/HYP.392

Page K.J., Nanson G.C., Price D.M. Chronology of Murrumbidgee River palaeochannels on the Riverine Plain, southeastern Australia // *Journal of Quaternary Science*. 1996. Vol. 11. P. 311–326.

Panin A.V., Sidorchuk A.Yu., Chernov A.V. Historical background to floodplain morphology: examples from the East European Plain // *Floodplains: interdisciplinary approaches*. London Geological Society Special Publications. 1999. Vol. 163. P. 217–229.

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. P. 29–41. DOI: 10.2298/IJGI0858029P

Reimer P., Austin W.E.N., Bard E., Bayliss A., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Butzin M., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaton T.J., Hogg A.G. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 kcal BP) // *Radiocarbon*. 2020. Vol. 62 (4). P. 725–757. DOI: 10.1017/RDC.2020.41

Romashin V.V. Types of channel process in connection with determining factors // *Proceedings of the State Hydrometeorological Institute*. Iss. 155. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968. P. 56–63.

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.Yu. Floodplain sedimentation: inherited memories // *Global and Planetary Change*. 2003. Vol. 39. No. 1–2. P. 13–29.

Sidorchuk A. The large rivers of the past in West Siberia: Unknown hydrological regimen // *Water*. 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*. 2000. Vol. 72 (1). P. 95–106.

Sidorchuk A.Y., Panin A.V., Borisova O.K. Morphology of river channels and surface runoff in the Volga River basin (East European Plain) during the Late Glacial period // *Geomorphology*. 2009. Vol. 113. P. 137–157.

Sidorchuk A.Yu., Panin A., Borisova O. Surface runoff to the Black Sea from the East European Plain during Last Glacial Maximum–Late Glacial time // *Geology and Geoarchaeology of the Black Sea Region: Beyond the Flood Hypothesis* / I. Buynevich, V. Yanko-Hombach, A.S. Gilbert, R.E. Martin (Eds.). Geological Society of America Special Paper 473. 2011. P. 1–25.

Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Borisova O.K., Kovalyukh N.N. Lateglacial and Holocene palaeohydrology of the lower Vycheгда river, western Russia // *River Basin Sediment Systems: Archives of Environmental Change* / D. Maddy, M.G. Macklin, J.C. Woodward (Eds.). A.A. Balkema Publ., 2001. P. 265–295.

Starkel L. The place of the Vistula River valley in the late Vistulian – early Holocene evolution of the European valleys // *European river activity and climatic change during the Lateglacial and early Holocene*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1995. P. 75–88.

Starkel L., Kalicki T., Soja R., Gębica P. Analysis of paleochannels in the valleys of the upper Vistula and the Wisłoka // *Evolution of the Vistula River valley during the last 15000 years*. Part VI. Wrocław: Wydawnictwo Continuo, 1996. P. 30–35.

Vandenbergh 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.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены в рамках государственной темы (ГЗ) № 121051100166-4 «Гидрология, морфодинамика и геоэкология эрозионно-русловых систем» и в рамках темы Государственного задания Института географии РАН № FMGE-2019-0005. Авторы статьи благодарны двум рецензентам за подробный анализ содержания статьи и ценные замечания, которые позволили улучшить текст.

## ОБ АВТОРАХ

Сидорчук Алексей Юрьевич, д.г.н., в.н.с., географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, fluvial05@gmail.com

Борисова Ольга Кимовна, д.г.н., гл.н.с., Институт географии РАН, borisova@igras.ru

Панин Андрей Валерьевич, член-корр. РАН, д.г.н., заместитель директора, Институт географии РАН, a.v.panin@igras.ru

## MORPHOLOGY OF RIVER CHANNELS AND WATER REGIME OF LARGE RIVERS OF THE PLAINS OF NORTHERN EURASIA 14–18 THOUSANDS YEARS AGO

A.Yu. Sidorchuk<sup>1\*</sup>, O.K. Borisova<sup>2</sup>, A.V. Panin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*

<sup>2</sup>*Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

\**fluvial05@gmail.com*

**Abstract.** At the end of the Pleniglacial to the first half of the Late Glacial, approximately 14,000–18,000 years ago, river channels on the plains of Northern Eurasia were up to 10–15 times larger than modern river channels in the same basins. Fragments of these large meandering paleochannels are widespread on river floodplains and low terraces. The hydrological regime of these rivers is of great interest from a paleoclimatological perspective. Morphometric characteristics of large paleochannels – channel width and meander wavelength – were measured on topographic maps and satellite images. Morphometric relationships between modern channel widths and average maximum water discharges were established. These relationships were used to reconstruct maximum discharges during floods for rivers in the Dnieper, Don, and Volga basins and the rivers in Western Siberia. The daily runoff depth at the flood maximum, which corresponds to the maximum depth of daily snowmelt during the snowmelt period, is normalized to unit river basins with an area of <1000 km<sup>2</sup>. The average value for the southern megaslope of the East European Plain was 50 mm/day (six times the modern value), including 50.6 mm/day (six times) for the Volga River basin, 50.7 mm/day (seven times) for the Don River basin, and 48 mm/day (10 times the modern value) for the Dnieper River basin. For the rivers of the north of the West Siberian Lowland, the average maximum daily runoff depth was 64 mm (2.5 times the modern value) and 54 mm in the Ob River basin (8 times the modern value). A paleohydrological analogy was used to convert these maximum runoff values into annual averages. The territories with the modern analogues for the climatic conditions of the late Pleniglacial – Lateglacial were determined on the basis of the paleofloristic method and according to data from mathematical climate modelling. Calculations revealed that on the southern megaslope of the East European Plain and on the West Siberian Lowland, over an area of 5.52 million km<sup>2</sup>, average snow water reserves before snowmelt were 309–390 mm, while flood runoff from this area, assumed to be close to the annual runoff volume, was 1706–2150 km<sup>3</sup>, which is 2.1–2.7 times greater than the modern value. These results contradict the established notion, based on the xerophilous vegetation, that the periglacial climate on the plains of Northern Eurasia was generally dry. The results of paleohydrological reconstructions showed that under the conditions of a periglacial climate, there was a sharp seasonality in the intra-annual distribution of precipitation; atmospheric precipitation in the form of snow covered the surface of river catchments during a long winter; spring snowmelt was short-lived and intense; floods were short with a high maximum. In summer, there was little precipitation and runoff from permafrost-covered areas was insignificant, which contributed to the development of xerophilous vegetation.

**Keywords:** large meandering rivers; late Pleniglacial; Lateglacial; morphometric relationships; paleogeographic analogy; models of atmospheric and oceanic circulation; maximum daily runoff depth; average annual river runoff

### REFERENCES

- Blom A., Arkesteijn L., Chavarrias Borrás V., Viparelli E. The equilibrium alluvial river under variable flow and its channel-forming discharge // *Journal of Geophysical Research. Earth Surface*. 2017. Vol. 122. P. 1924–1948. DOI: 10.1002/2017JF004213.
- Borisova O.K. Landscape and climatic conditions in the central part of the East European Plain over the last 22,000 years (Reconstruction Based on Paleobotanical Data) // *Water Resources*. 2021. Vol. 48. No. 6. P. 886–896. DOI: 10.1134/S0097807821060038
- Borisova O.K., Sidorchuk A.Yu., Panin A.V. Palaeohydrology of the Seim River basin, Mid-Russian Upland, based on palaeochannel morphology and palynological data // *Catena*. 2006. Vol. 66. P. 53–78.
- Borsy Z., Felegyhazi E. Evolution of the network of water courses in the northeastern part of the Great Hungarian Plain from the end of the Pleistocene to our days // *Quaternary Studies in Poland*. 1983. Vol. 4. P. 115–124.
- Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Aleksandrova T.M. Description of the data array of daily air temperature and precipitation amount at meteorological stations in Russia and the Former USSR (TTTR). Certificate of state registration of the database No. 2014620942 dated July 2, 2014. (In Russ.)
- Bylinsky E.N., Vostokov E.N. The main watershed of the Russian Plain, its tectonic nature and glaciostatic mechanism of formation // *Geomorfologiya*. 1976. No. 3. P. 26–37. (In Russ.)

- Chalov R.S. On the classification of river channels // *Geomorfologiya*. 1980. No. 1. P. 3–16. (In Russ.)
- Dokuchaev V.V. Methods of formation of river valleys in European Russia. St. Petersburg: V. Dermakov Printing House, 1878. 221 p. (In Russ.)
- Dury G.H. Contribution to a general theory of meandering valleys // *American Journal of Science*. 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
- Evstigneev V.M. River runoff and hydrological calculations. Moscow: Moscow State University Press, 1990. 304 p. (In Russ.)
- Gábris G., Nádor A. Long-term fluvial archives in Hungary: response of the Danube and Tisza rivers to tectonic movements and climatic changes during the Quaternary: a review and new synthesis // *Quaternary Science Reviews*. 2007. Vol. 26. P. 2758–2782.
- Gelfan A., Panin A., Kalugin A., Morozova P., Semenov V., Sidorchuk A., Ukraintsev V., Ushakov K. Hydroclimatic processes as the primary drivers of the Early Khvalynian transgression of the Caspian Sea: new developments // *Hydrology and Earth System Science*. 2024. Vol. 28. P. 241–259.
- Georgievskiy V.Yu. Main hydrological characteristics of water bodies of the Don River basin. St. Petersburg: GGI Publishing House, 2020. 262 p. (In Russ.)
- Glushkov V.G. Geographical and Hydrological Method // *Izvestiya GGI*. 1933. Vol. 57. P. 89–95. (In Russ.)
- Grichuk V.P. Glacial floras and their classification // *The Last Glacial Cover in the North-West of the European Part of the USSR*. Moscow: Nauka, 1969. P. 57–70. (In Russ.)
- Grichuk V.P. Late Pleistocene vegetation // *Dynamics of landscape components and inland marine basins of Northern Eurasia over the last 130,000 years / A.A. Velichko (Ed.)*. Moscow: GEOS, 2002. P. 64–89. (In Russ.)
- Gutiérrez J.M., Jones R.G., Narisma G.T., Alves L.M., Amjad M., Gorodetskaya I.V., Grose M., Klutse N.A.B., Krakovska S., Li J., Martínez-Castro D., Mearns L.O., Mernild S.H., Ngo-Duc T., van den Hurk B., Yoon J.-H. Atlas // *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / V. Masson-Delmotte, P. Zhai et al. (Eds.)*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021. P. 1927–2058. DOI: 10.1017/9781009157896.021.
- Howard A.J., Macklin M.G., Bailey D.W., Mills S., Andreescu R. Late-glacial and Holocene river development in the Teleorman Valley on the southern Romanian Plain // *Journal of Quaternary Science*. 2004. Vol. 19. P. 271–280.
- Inglis C.C. Meanders and their bearing on river training // *Institution of Civil Engineers. Maritime and Waterways engineering Division*. 1947. Vol. 7. P. 3–54.
- Kapsch M.-L., Mikolajewicz U., Ziemer F., Schanwell C. Ocean response in transient simulations of the last deglaciation dominated by underlying ice-sheet reconstruction and method of meltwater distribution // *Geophysical Research Letters*. 2022. Vol. 49, e2021GL096767. DOI: 10.1029/2021GL096767
- Khrutsky S.V., Smolyaninov V.M., Kostsova E.V. Album of geological sections of the central black earth regions. Voronezh: Voronezh State University Publishing House, 1974. 176 p. (In Russ.)
- Komarov V.D. Spring runoff of lowland rivers in the European part of the USSR, conditions of its formation and forecast methods. Moscow: Gidrometeoizdat, 1959. 296 p. (In Russ.)
- Kozarski S., Rotnicki K. Valley floors and changes of river channel patterns in the north Polish Plain during the Late-Würm and Holocene // *Questiones Geographicae*. 1977. Vol. 4. P. 51–93.
- Kremenetski C.V., Boettger T., Junge F.W., Tarasov A.G. Late- and postglacial environment of the Buzuluk area, middle Volga region, Russia // *Quaternary Science Reviews*. 1999. Vol. 18. P. 1185–1203.
- Leopold L.B., Maddock T. The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications // *US Geological Survey Professional Paper*. Washington, DC, USA: United States Government Printing Office. 1953. Vol. 252. 57 p.
- Leopold L.B., Wolman M.G. River Meanders // *Bulletin of the Geological Society of America*. 1960. Vol. 71. P. 769–794.
- Makkaveev N.I. (Ed.) Design of the navigation routes on free rivers, Moscow: Transport, 1964. 263 p. (In Russ.)
- Makkaveev N.I. River channel and erosion in its basin. Moscow: USSR Academy of Sciences Press, 1955. 346 p. (In Russ.)
- Makkaveev N.I., Khmeleva N.V., Gong Guo-yuan. Free Meanders // *Experimental Geomorphology. Issue 2 / N.I. Makkaveev (Ed.)*. Moscow: Moscow University Press, 1969. P. 25–62. (In Russ.)
- Makkaveev N.I., Sovetov V.S. Tracing Dredging Cuts on Riffles of Lowland Rivers in the European USSR // *Proceedings of the Central Research Institute of the Russian Federation*. 1940. Issue 3. 60 p. (In Russ.)

- Matlakhova E.Yu. Macrobends of the Vorona River as Evidence of Powerful River Runoff in the Late Glacial // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*. 2021. No. 2. P. 103–109. (In Russ.)
- Matoshko A., Gozhik P., Ivchenko A.S. The fluvial archive of the Middle and Lower Dnieper (a review) // *Netherlands Journal of Geosciences*. 2002. Vol. 81. P. 339–355. DOI: 10.1017/S0016774600022642
- Matveeva T., Sidorchuk A. Modelling of Surface Runoff on the Yamal Peninsula, Russia, Using ERA5 Reanalysis // *Water*. 2020. Vol. 12. Paper 2099. DOI: 10.3390/w12082099
- Mikhailov V.N., Rogov M.M., Chistyakov A.A. River Deltas. Hydrological and Morphological Processes. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. 279 p. (In Russ.)
- Nachtergaele J., Poesen J., Sidorchuk A., Torri D. Prediction of concentrated flow width in ephemeral gully channels // *Hydrological Processes*. 2002. Vol. 16(10). P. 1935–1953. DOI: 10.1002/HYP.392
- National Atlas of Russia: in 4 volumes. Vol. 2. Nature. Ecology. Moscow: Roskartografiya, 2007. 495 p. (In Russ.)
- Nevalenny Yu.V. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. 2nd ed. Donetsk Series. Sheet L-37-V (Shakhty). Explanatory Note. Moscow, 2000. 183 p. (In Russ.)
- Novikov S.M. (Ed.) Hydrology of wetlands of the permafrost zone of Western Siberia. St. Petersburg: VVM, 2009. 536 p. (In Russ.)
- Obedientova G.V. Erosion cycles and formation of the Volga valley. Moscow: Nauka, 1977. 240 p. (In Russ.)
- Page K.J., Nanson G.C., Price D.M. Chronology of Murrumbidgee River palaeochannels on the Riverine Plain, southeastern Australia // *Journal of Quaternary Science*. 1996. Vol. 11. P. 311–326.
- Panin A.V., Sidorchuk A.Yu. Macrobends («large meanders»): problems of origin and interpretation // *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5: Geografiya*. 2006. No. 6. P. 14–22. (In Russ.)
- Panin A.V., Sidorchuk A.Yu., Baslerov S.V., Borisova O.K., Kovalyukh N.N., Sheremetskaya E.D. Main stages in the history of river valleys in the central Russian Plain in the late Valdai and Holocene: results of studies in the middle reaches of the Seim River // *Geomorfologiya*. 2001. No. 2. P. 19–34. (In Russ.)
- Panin A.V., Sidorchuk A.Yu., Chernov A.V. Historical background to floodplain morphology: examples from the East European Plain // *Floodplains: interdisciplinary approaches*. London Geological Society Special Publications. 1999. Vol. 163. P. 217–229.
- Panin A.V., Sidorchuk A.Yu., Chernov A.V. Macrobends of the ETS rivers and problems of paleohydrological reconstructions // *Water Resources*. 1992. No. 4. P. 93–97.
- Panin A.V., Sidorchuk A.Yu., Ukraintsev V.Yu. The contribution of glacial melt water to runoff of river Volga in the last glacial epoch // *Water resources*. 2021. Vol. 48. No. 6. P. 877–885. DOI: 10.1134/s0097807821060142
- Panin A.V., Sidorchuk A.Yu., Vlasov M.V. Powerful late Valdai river runoff in the Don basin // *Izvestiya RAN. Geographical Series*. 2013. No. 1. P. 118–129. (In Russ.)
- Physical-Geographical Atlas of the World. Moscow: Institute of Geography of the USSR Academy of Sciences and GUGK, 1964. 300 p. (In Russ.)
- 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. P. 29–41. DOI: 10.2298/IJGI0858029P
- Reimer P., Austin W.E.N., Bard E., Bayliss A., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Butzin M., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaton T.J., Hogg A.G. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 kcal BP) // *Radiocarbon*. 2020. Vol. 62 (4). P. 725–757. DOI: 10.1017/RDC.2020.41
- Romashin V.V. Types of channel process in connection with determining factors // *Proceedings of the State Hydrometeorological Institute*. Iss. 155. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968. P. 56–63. (In Russ.)
- 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*. 2023. Vol. 15, no. 2. P. 258. DOI: 10.3390/w15020258
- Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Borisova O.K. Climate-induced changes in surface runoff on the plains of North-Eurasian plains in the late glacial and Holocene // *Water Resources*. 2008. Vol. 35. P. 386–396. DOI: 10.1134/S0097807808040027
- Sidorchuk A.Y., Panin A.V., Borisova O.K. Morphology of river channels and surface runoff in the Volga River basin (East European Plain) during the Late Glacial period // *Geomorphology*. 2009. Vol. 113. P. 137–157.
- Sidorchuk A.Yu. Floodplain sedimentation: inherited memories // *Global and Planetary Change*. 2003. Vol. 39. No. 1–2. P. 13–29.
- Sidorchuk A.Yu., Borisova O.K. Method of paleogeographical analogues in paleohydrological recon-

structions // *Quaternary International*. 2000. Vol. 72 (1). P. 95–106.

Sidorchuk A.Yu., Borisova O.K., Panin A.V. Late Valdai paleochannels of the rivers of the Russian Plain // *Izvestiya RAN. Geographical Series*. 2000. No. 6. P. 73–78. (In Russ.)

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. No. 2. P. 172–190. (In Russ.)

Sidorchuk A.Yu., Panin A., Borisova O. Surface runoff to the Black Sea from the East European Plain during Last Glacial Maximum–Late Glacial time // *Geology and Geoarchaeology of the Black Sea Region: Beyond the Flood Hypothesis* / I. Buynevich, V. Yanko-Hombach, A.S. Gilbert, R.E. Martin (Eds.). Geological Society of America Special Paper 473. 2011. P. 1–25.

Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Borisova O.K. River runoff on the East European Plain over the past 20 thousand years and the problem of changing levels of the southern seas // *Voprosy geografii*. Iss. 145. Hydrological changes. Moscow: Publishing House «Kodeks», 2018. P. 144–168. (In Russ.)

Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Borisova O.K., Kovalyukh N.N. Lateglacial and Holocene palaeohydrology of the lower Vychehda river, western Russia // *River Basin Sediment Systems: Archives of Environmental Change* / D. Maddy, M.G. Macklin, J.C. Woodward (Eds.). A.A. Balkema Publ., 2001. P. 265–295.

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. P. 864–876.

DOI: 10.1134/S0097807821060178

Starkel L. The place of the Vistula River valley in the late Vistulian – early Holocene evolution of the European valleys // *European river activity and climatic change during the Lateglacial and early Holocene*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1995. P. 75–88.

Starkel L., Kalicki T., Soja R., Gębica P. Analysis of paleochannels in the valleys of the upper Vistula and the Wisloka // *Evolution of the Vistula River valley during the last 15000 years*. Part. VI. Wrocław: Wydawnictwo Continuo, 1996. P. 30–35.

Ukraintsev V.Yu. Late Valdai paleochannels of the rivers in the Volga basin: conditions of formation, age, paleogeographic significance. Candidate of Science dissertation in specialty 1.6.14 - Geomorphology and Paleogeography (Geographical Sciences). 2023 (In Russ.)

Ukraintsev V.Yu., Zazovskaya E.P., Zakharov A.L., Maksimov F.E., Petrov A.Yu. On the timing of the epoch of abundant river flow in the Volga basin // *Water resources*. 2024. Vol. 51. No. 3. P. 163–170.

DOI: 10.1134/S0097807824700714

Vandenbergh 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.

Velikanov M.A. Channel process. Moscow: Fizmatgiz, 1958. 395 p. (In Russ.)

Vinogradov Yu.B. Mathematical modelling of runoff formation processes. An experience of critical analysis. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988. 312 p. (In Russ.)

Volkov I.A. On the recent past of the Ishim and Nura rivers // *Transactions of the Aerospace Methods Laboratory of the USSR Academy of Sciences*. 1960. No. 9. P. 59–71. (In Russ.)

Volkov I.A. Traces of powerful runoff in the river valleys of the south of Western Siberia // *Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1963. Vol. 151. No. 3. P. 23–25. (In Russ.)

Zolnikov I.D., Filatov E.A., Shpansky A.V., Glushkova N.V., Danilson D.A., Bordyugova E.A. Geological evidence of Megafloods in the upper Ob region // *Geomorfologiya i paleogeografiya*. 2024. Vol. 55. No. 4. P. 13–25. DOI: 10.31857/S2949178924040023 (In Russ.)

Zykina V.S., Volkov I.A., Dergacheva M.I. Upper Quaternary deposits and fossil soils of the Novosibirsk Ob region. Moscow: Nauka, 1981. 203 p. (In Russ.)

## ACKNOWLEDGEMENTS

The research was carried out within the framework of the State Assignment No. 121051100166-4 “Hydrology, morphodynamics and geocology 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. The authors of the article are grateful to two reviewers for a detailed analysis of the article’s content and valuable comments that allowed us to improve the text.

## ABOUT THE AUTHORS

Alexey Yuryevich Sidorchuk, Doctor of Geographical Sciences, Principal Scientist, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, fluvial05@gmail.com

Olga Kimovna Borisova, Doctor of Geographical Sciences, Principal Scientist, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, borisova@igras.ru

Panin Andrey Valerievich, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Geographical Sciences, Deputy Director, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, a.v.panin@igras.ru