

СНИЖЕНИЕ СТОКА РЕК РАВНИН СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ В ОПТИМУМ ГОЛОЦЕНА

© 2012 г. А. Ю. Сидорчук*, А. В. Панин*, О. К. Борисова**

*Московский государственный университет

119991 Москва ГСП-1, Ленинские горы

**Институт географии Российской академии наук

119017 Москва, Старомонетный пер., 29

Поступила в редакцию 03. 02. 2011 г.

Выделено три этапа развития меандрирующих рек и формирования гривистых пойм в Северной Евразии: развития рек большего размера, чем современные; развития рек меньше современных; развития рек современного морфодинамического типа. На поймах рек равнин Северной Евразии широко распространены малые старицы второго этапа. Наибольшее количество участков пойм с такими старицами выделяется в лесной зоне, в основном в хвойных лесах северо-востока европейской территории России. Имеющиеся радиоуглеродные датировки показывают, что существенное уменьшение размеров русел рек и увеличение крутизны излучин происходили на протяжении атлантического периода голоцена. На основании данных об изменении размеров речных русел рассчитаны соотношения палео- и современных расходов, построена карта отклонений слоя стока в оптимум голоцена от современного и оценены изменения объема стока воды. В бассейнах Вятки и среднего Иртыша расходы воды составляли всего 40–50% современных. К северу, востоку и западу от этих бассейнов отношение древних и современных расходов увеличивается. На северном мегасклоне Русской равнины сток воды в оптимум голоцена составлял ~180 км³ в год, что на 30% меньше современного стока с той же водосборной площади. В бассейне Волги годовой сток составлял ~134 км³, что почти в два раза меньше современного. В бассейнах Дона и Днепра сток в оптимум голоцена был на 40, Оби и Иртыша на 30% меньше современного. Если принять гипотезу, что оптимум голоцена представлял собой климатический аналог глобального антропогенного потепления середины XXI в., то сделанные оценки состояния водных ресурсов Северной Евразии имеют большое прогностическое значение.

Ключевые слова: палеогидрология, речной сток, оптимум голоцена, малые русла рек, равнины Северной Евразии, антропогенные изменения, водные ресурсы XXI в.

В условиях глобального изменения климата большой интерес вызывают реконструкции природных условий древних эпох с более теплым климатом, в том числе реконструкции речного стока. Они могут служить аналогами условий более теплого климата в будущем. Одна из таких эпох – оптимум голоцена ~6000 лет назад (л.н.), для которого реконструирована средняя температура воздуха северного полушария на 1°C больше современной. Это дает возможность исследователям палеоклиматов [2] предполагать, что оптимум голоцена – климатический аналог некоторого этапа глобального антропогенного потепления. Реконструкциям природных условий оптимума голоцена посвящена большая литература. Назовем лишь несколько работ, где приведены результаты применения основных методов реконструкции палеоклимата, основанных на интерпретации данных споропыльцевого анализа: палеофлористический [12], зонально-формационный [27] и информационно-статистический [7].

Количественные реконструкции водного баланса и водоносности рек этого периода для территории равнин Северной Евразии проводились тремя методами. Наибольшее число работ выполнено в рамках первого метода – оценки изменения уровней озер, включая уровни Каспийского и Аральского морей [4, 26, 33, 34]. К нему примыкает оценка увлажнения по скоростям осадконакопления в озерах и болотах. Этот метод позволяет оценить только общие тенденции. Пересчет изменения объема воды в озерах в объем речного стока требует оценки региональных осадков и испарения, т.е. привлечения других методов палеогеографических реконструкций. Индикаторы положения палеоуровня озера допускают неоднозначные толкования. Так, кривые изменения уровня Каспийского моря в голоцене, построенные разными исследователями [4, 34], весьма существенно различаются.

Второй метод включает реконструкцию климатических характеристик на речном водосборе

(температуры воздуха и осадков) по данным спорово-пыльцевого анализа отложений соответствующего возраста и расчет речного стока по модели водного баланса [1, 6, 8]. Результаты определяются наличием и детальностью палинологических данных для конкретной территории, особенностями способа реконструкции климата, а также принятой моделью водного баланса. В настоящее время для палеогидрологических расчетов разными исследователями используется одна и та же база палеоклиматических реконструкций для оптимума голоцена [7], поэтому результаты этих расчетов близки между собой [1, 19] и требуют проверки независимыми данными.

Третий метод включает реконструкцию климатических характеристик на речном водосборе на основе математического моделирования общей циркуляции атмосферы и расчет речного стока по модели водного баланса. Этот перспективный метод находится на стадии становления: в настоящее время расчеты по разным моделям дают существенно различающиеся результаты [11, 17].

В условиях неоднозначности результатов, полученных первым и третьим методами, и слабой степенью проверки данных, полученных вторым методом, целесообразно применить для оценки стока рек равнин Северной Евразии в оптимум голоцена независимый морфометрический палеогидрологический метод, основанный на достаточно тесных связях между размерами русел рек и их водоносностью. Становление палеогидрологии как раздела гидрологии суши происходило в 1950–1960 гг. главным образом на основе изучения морфологических характеристик староречий на поймах рек. При этом было обнаружено, что размеры этих староречий (ширина, шаг излучин) существенно отличаются от размеров русел соответствующих современных рек. Уже в пионерных работах Г. Дьюри [32] и И.А. Волкова [10] было выявлено широкое распространение староречий большего размера, чем современные русла тех же рек. Н.И. Маккавеев с соавторами [20] впервые показал, что на поймах меандрирующих рек выделяются как староречья большего размера, чем современные, так и более мелкие старицы. Существенные отличия размеров древних рек от размеров современных обусловлены значительными колебаниями их водоносности и/или трансформацией гидрологического режима, связанными с изменениями климата в прошлом. Исследования морфологии русел древних рек [22–25, 35–37] позволили провести реконструкцию величины палеостока рек равнин Северной Евразии для позднеледникового времени. При этом были разработаны основы метода морфометрического палеогидрологического анализа и проведена оценка его точности [24, 35]. Задача настоящей работы — оценка водоносности рек равнин Северной Евразии (Восточно-Европейской равнины, Западно-

сибирской низменности и равнин Восточной Сибири) в оптимум голоцена на основе изучения морфометрии русел древних рек и условий их формирования.

МЕТОД МОРФОМЕТРИЧЕСКОГО ПАЛЕОГИДРОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Методика исследований была подробно изложена в [24, 35]; здесь дадим ее краткий обзор. На космических изображениях высокого разрешения, крупномасштабных картах и аэрофотоснимках выделяются хорошо выраженные фрагменты меандрирующих палеорусел на поймах и низких террасах (староречья). На ключевых участках проводится бурение в палеорусле, радиоуглеродным методом определяется их возраст, палеофлористическим методом — условия образования. Измеряются морфометрические характеристики староречий — ширина русла в областях смены кривизны излучин W , м, и шаг излучин λ , м. Для уменьшения ошибок, возникающих при измерениях и за счет вариации параметров русла по длине реки, обмеряется максимально возможное число N фрагментов палеорусел на бесприточном участке реки и рассчитывается эффективная средняя ширина палеорусла в бровках по формуле

$$\bar{W}^* = \frac{\sum_{n=1}^N W_n + \sum_{n=1}^N (\lambda_n/5.7)}{2N}. \quad (1)$$

Для больших староречий относительная ошибка оценки средней эффективной ширины составляет ~15%, для малых староречий и современного русла 3–6%.

Для оценки среднегодового палеорасхода воды \bar{Q} , м³/с, используется эмпирическая зависимость, полученная для современных меандрирующих рек равнин Северной Евразии

$$\bar{Q} = 0.012y^{0.73} (\bar{W}^*)^{1.36}. \quad (2)$$

Внутригодовая изменчивость стока y в первом приближении характеризуется соотношением среднегодового и среднемаксимального $Q_{\text{макс}}$ расхода воды

$$y = 100\bar{Q}/Q_{\text{макс}}. \quad (3)$$

Она связана с размером водосбора реки F , км², эмпирической редуцированной зависимостью

$$y = aF^n. \quad (4)$$

Коэффициенты a и n зависят от ландшафтных условий на водосборе и поддаются географическому районированию. Это создает основу для применения в палеогидрологии принципа палеогеографической аналогии [35]: характеристики стока для древних речных бассейнов близки к ха-

рактикам стока для таких современных бассейнов, где условия сходны с палеогеографическими. Для реконструкции стока определяется современная область, которая по комплексу ландшафтно-климатических признаков — аналог бассейна древней реки. Основным методом выбора аналога — палеофлористический анализ палинологических данных [35]. Предполагается, что современный гидрологический режим рек в пределах региона-аналога близок к гидрологическому режиму древних рек. Для современных рек региона-аналога определяются значения коэффициентов a и n , которые затем используются для расчетов параметра y по формуле (4). Среднегодовой расход воды определяется по зависимости (2), а среднемаксимальный расход воды — по формуле (3). Ошибки оценок палеогидрологических характеристик лежат в пределах 20–25% [24].

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЧНЫХ ПОЙМ НА РАВНИНАХ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ

На поймах меандрирующих рек обычно отчетливо читаются веера блуждания древних русел, хорошо выражены системы староречий. Морфометрические характеристики древних русел — ширина русла, амплитуда и шаг излучин — оцениваются вполне достоверно. Полевые исследования, а также анализ космических изображений, опубликованных в Интернете (Google Планета Земля), показывают [21], что развитие пойм меандрирующих рек на равнинах Северной Евразии проходило в три основных этапа (рис. 1).

Первый этап связан с реками очень больших размеров: ширина, шаг и амплитуда излучин их русел превосходили размеры современных рек в 13–15 раз. На этом этапе были сформированы очень широкие поймы, соответствующие поясу меандрирования этих больших рек. К настоящему времени эти поймы частично вышли из-под уровня затопления и превратились в низкие террасы.

На втором этапе поймы формировались реками в 1.5–2.0 раза меньших размеров, чем современные, с более крутыми излучинами. Иногда поймы этого этапа занимают лишь небольшую часть пойменного массива, созданного большими руслами предшествующего этапа, но нередко значительная часть древней унаследованной поймы оказывалась переработанной в ходе блуждания малых меандрирующих рек, и тогда следы первого этапа формирования пойм в рельефе данного участка речной долины не выражены.

Третий, современный этап формирования речных пойм связан с увеличением размеров рек и одновременным уменьшением амплитуды излучин речных русел. В результате пояс меандрирования рек стал уже, что способствовало сохранению

рельефа предыдущих этапов на многих участках пойм. Только на самых крупных реках пойма на данном этапе была полностью переработана. Тем не менее, блуждание меандрирующих рек приводит к уничтожению древнего пойменного рельефа, поэтому названные характерные этапы образования пойм обычно выявляются лишь при рассмотрении достаточно протяженных участков речных долин.

Этап больших рек

На Русской равнине, в Западной Сибири и северном Казахстане большие меандрирующие палеорула обнаружены во всех ландшафтных зонах от тундры до сухой степи. Описано > 250 хорошо выраженных в рельефе фрагментов палеоизлучин [22–24, 36]. Их образование относится к периоду 13–16 тыс. л.н. (здесь и далее — по радиоуглеродной шкале времени), т.е. к начальному этапу дегляциации. В это время на северном мегасклоне Русской равнины сток воды составлял ~380 км³ в год, что в полтора раза больше современного стока с той же водосборной площади. В бассейне Волги годовой сток составлял ~500 км³. Основной вклад в этот сток вносили Ока и Кама, сток которых был больше современного в 3–3.5 раза. Поздневалдайский сток в бассейнах Днепра и Дона превышал современный в 3–4 раза. В бассейне Оби сток был в 2 раза больше современного, в бассейне Иртыша — в 3 раза больше [24].

Этап малых рек

Многие системы древних русел, видимые на поймах рек, имеют ширину и размеры излучин меньше, чем у соответствующих современных русел. Часто это связано с формированием пойменной многорукавности — образованием пойменных протоков, размеры которых меньше размеров основного русла и варьируют в широких пределах. Иногда это следы блуждания притоков на поймах основных рек. Такие морфологические элементы не могут напрямую использоваться для палеогидрологических реконструкций. Однако на большом количестве участков речных долин малые размеры староречий и вееров блуждания древних русел трудно объяснить упомянутыми явлениями. Существование в прошлом единого древнего меандрирующего русла малых размеров наиболее очевидно, когда его фрагменты прослеживаются в виде староречий как на правобережных, так и на левобережных массивах поймы, а современное русло с более крупными излучинами занимает осевое положение (рис. 2а). В других случаях следы единого малого палеорула прослеживаются на участках с односторонней поймой и прижатым к коренному (террасовому) берегу современным руслом (рис. 2б). Конечно, в каждом

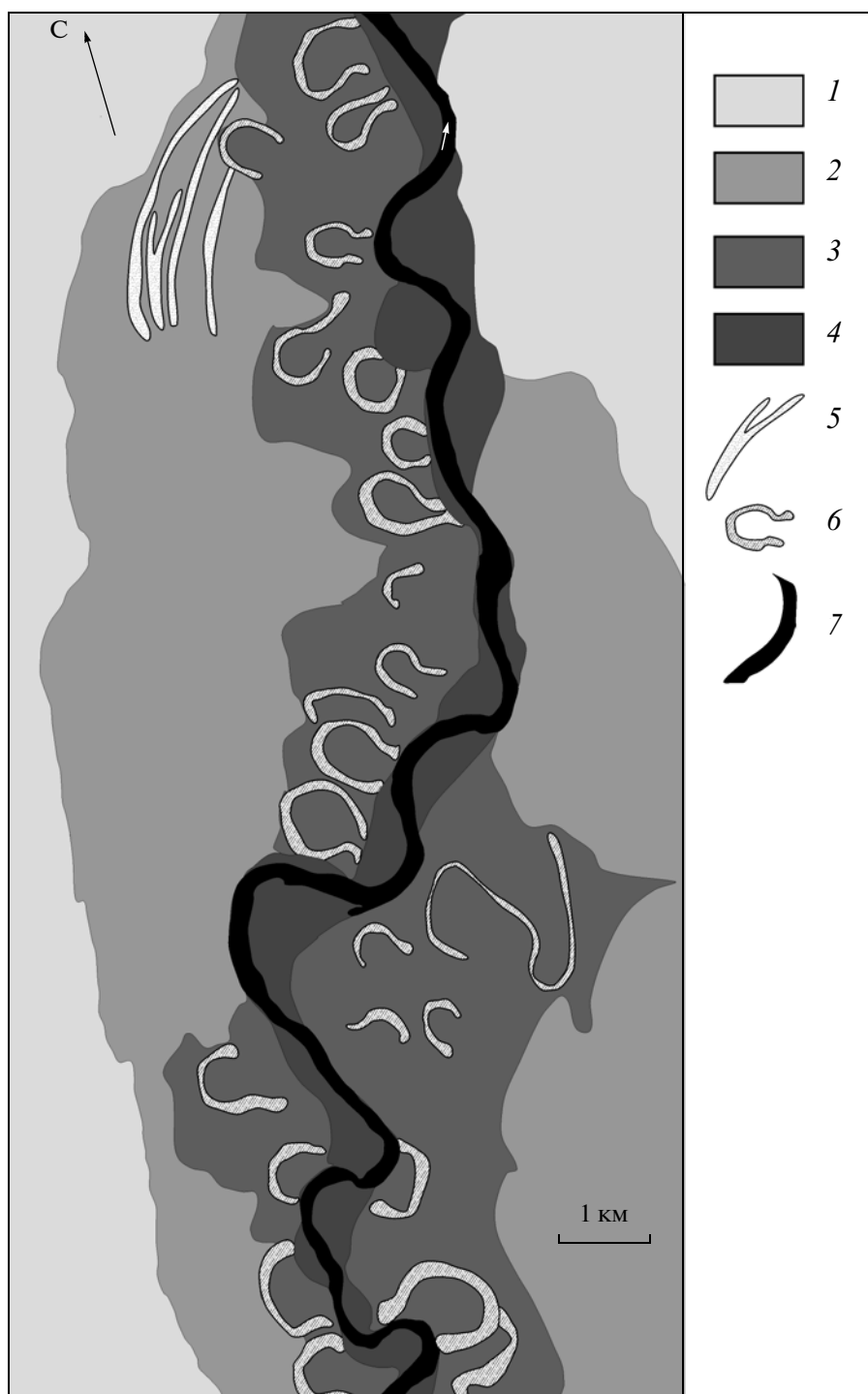


Рис. 1. Морфология поймы р. Сысолы выше Сыктывкара. 1 – коренные борта долины и террасы, 2–4 – поймы первого, второго, третьего (современного) этапов формирования соответственно, 5 – прирусловые гряды большого радиуса кривизны на пойме первого этапа, 6 – старицы русла малого радиуса кривизны на пойме второго этапа, 7 – современное русло с пологими излучинами.

конкретном случае необходим детальный анализ изменения морфологии русла, и этот анализ не лишен субъективности.

В результате такого анализа на равнинах Северной Евразии по космическим снимкам авторами выделено 56 участков, где на поймах достовер-



Рис. 2. Трансформация русла из крутомеандрирующего с малыми излучинами в пологомеандрирующее с большими излучинами и побочными на реках Хадуттэ (приток нижнего Пура, № 19 в табл. 1) – участок с двухсторонней поймой (а) и Мезени (№ 6 в табл. 1) – участок с односторонней поймой (б).

но выделяются следы единого древнего меандрирующего русла с шагом излучин меньшим, чем у современного русла. С увеличением количества космических снимков высокого разрешения число этих участков будет увеличиваться, но общая картина видна уже сейчас (табл. 1). В зоне тундры

таких участков не обнаружено, но в лесотундре малые древние русла встречаются (р. Хадуттэ). Наибольшее количество таких участков выделяется в лесной зоне, в основном в таежных лесах северо-востока ЕТР, особенно в бассейнах Вычегды и Вятки. Малые древние русла есть также в зоне

Таблица 1. Средние морфометрические характеристики русел рек (шаг $\bar{\lambda}$ и амплитуда \bar{A} излучин, ширина русла \bar{W}), на которых выделены фрагменты палеорусел с мальми меандрами и соотношения характеристик древних и современных русел (прочерк – недостаток данных для вычисления среднего)

Номер участка	Река	с. ш	в. д	Современное русло			Древнее русло			$\frac{\bar{W}_d^*}{\bar{W}_c^*}$	$\left(\frac{\bar{A}}{\bar{\lambda}}\right)_d / \left(\frac{\bar{A}}{\bar{\lambda}}\right)_c$	$\frac{\bar{Q}_d}{\bar{Q}_c}$
				$\bar{\lambda}$, м	\bar{A} , м	\bar{W} , м	$\bar{\lambda}$, м	\bar{A} , м	\bar{W} , м			
1	Паденьга	61.85	42.50	433	167	41	123	122	30	0.44	0.39	0.36
2	Пеза	65.72	45.65	2262	—	215	908	—	157	0.52	—	0.45
3	Уфлюга	61.63	46.62	767	301	165	468	479	105	0.62	0.38	0.59
4	Вычегда (устье)	61.28	46.65	6000	2000	1100	3500	2500	600	0.55	0.33	0.49
5	Юг	60.33	47.08	2540	—	313	993	—	195	0.49	—	0.42
6	Мезень	63.97	47.20	1517	370	286	1060	857	208	0.71	0.30	0.70
7	Ель	63.97	47.20	1489	—	262	1071	—	208	0.76	—	0.76
8	Виледь	61.33	47.38	575	—	114	216	—	44	0.38	—	0.30
9	Луза	60.60	48.07	1280	388	206	733	673	155	0.66	0.33	0.63
10	Яренга	62.20	48.97	1034	276	182	636	461	107	0.60	0.37	0.56
11	Сысола	63.52	50.70	1093	350	178	403	546	120	0.51	0.24	0.45
12	Пижма	65.05	52.02	792	336	143	398	412	123	0.68	0.41	0.66
13	Вычегда (Пезмог)	61.87	52.05	2677	785	398	1692	1562	319	0.71	0.32	0.70
14	Вычегда (Усть-Нем)	61.58	54.63	1396	497	197	841	961	129	0.63	0.31	0.59
15	Кама	60.23	55.28	1863	284	321	1076	1020	196	0.59	0.16	0.55
16	Колва	66.03	57.23	2434	293	327	1582	1470	246	0.69	0.13	0.68
17	Печора	63.87	57.28	6662	—	603	2900	—	425	0.53	—	0.46
18	Иртыш (устье)	61.03	69.03	4498	—	555	3810	—	—	0.85	—	—
19	Хадутгэ	67.45	76.33	2515	707	586	1451	1367	290	0.53	0.30	0.47
20	Нгарка-табяха	66.63	76.58	945	426	190	682	749	145	0.74	0.41	0.74
21	Таз	63.70	84.42	630	—	110	431	—	—	0.68	—	—
22	Тюнг	63.92	121.52	1690	551	265	1114	1101	270	0.83	0.33	0.86
23	Вилюй	63.77	121.58	5671	—	913	6742	—	706	0.99	—	1.10
24	Яна	70.00	135.53	5150	2055	765	2780	1677	523	0.60	0.66	0.56
25	Западный Буг	52.68	21.87	1042	269	107	522	497	105	0.68	—	0.65
26	Днестр	49.18	24.59	1135	305	125	577	547	105	0.63	0.28	0.60
27	Неман	53.52	25.35	819	216	122	444	403	78	0.59	0.29	0.54
28	Березина	53.23	29.20	648	251	94	447	353	80	0.76	0.49	0.77
29	Днепр	54.97	32.98	740	310	113	320	426	93	0.61	0.32	0.57
30	Десна	52.63	34.00	1060	212	129	423	384	75	0.47	0.22	0.40
31	Северский Донец	48.33	40.23	1434	418	173	694	589	114	0.55	0.34	0.50
32	Дон	49.93	40.85	1650	461	162	949	806	164	0.73	0.33	0.72
33	»	49.58	42.63	1676	248	240	1443	941	189	0.83	0.23	0.86
34	»н	48.90	43.67	2793	640	405	1909	1285	358	0.77	0.34	0.78
35	Сура	55.90	46.10	1918	511	285	758	942	178	0.50	0.21	0.43
36	Ветлуга	56.38	46.32	1635	—	242	892	—	225	0.72	—	0.71
37	Молома	58.72	48.45	1159	324	157	352	493	94	0.43	0.20	0.35
38	Великая	58.88	49.03	454	113	54	260	223	53	0.74	—	0.73
39	Быстрица	58.55	49.25	513	79	75	247	209	46	0.54	0.18	0.48
40	Белая Холуница	58.87	50.58	439	172	77	148	138	36	0.40	0.42	0.32
41	Кильмезь	56.97	51.10	1032	286	136	329	362	43	0.32	0.25	0.23

Таблица 1. Окончание

Номер участка	Река	с. ш	в. д	Современное русло			Древнее русло			$\frac{W_d^*}{W_c^*}$	$\frac{(\bar{A})_d}{(\bar{A})_c}$	$\frac{\bar{Q}_d}{\bar{Q}_c}$
				$\bar{\lambda}$, м	\bar{A} , м	\bar{W} , м	$\bar{\lambda}$, м	\bar{A} , м	\bar{W} , м			
42	Вятка	55.70	51.42	5175	—	494	2384	—	331	0.53	—	0.47
43	Буй	56.23	54.30	403	115	89	222	267	57	0.60	0.24	0.55
44	Белая	55.25	55.58	3225	1164	414	1444	2017	399	0.66	0.26	0.64
45	»	52.88	56.20	842	239	165	482	580	102	0.60	0.24	0.55
46	Тобол (Ялуторовск)	56.70	66.42	954	354	110	413	584	117	0.68	0.26	0.66
47	Тобол (устье Тавды)	57.77	67.30	1642	—	253	1145	—	—	0.7	—	—
48	Иртыш (устье Увата)	59.58	69.32	4596	1628	538	1897	2499	491	0.61	0.27	0.57
49	Иртыш (Тевриз)	57.55	70.05	3207	1723	343	1397	1530	304	0.60	0.49	0.56
50	Иртыш (Омск)	55.00	73.23	2937	—	361	1664	—	315	0.69	—	0.67
51	Васюган	59.12	76.90	750	308	110	367	412	111	0.72	0.37	0.71
52	Чарыш	52.08	82.63	1093	468	196	665	878	166	0.73	0.32	0.72
53	Обь	53.47	83.10	3951	772	674	3924	2576	648	0.98	0.30	1.08
54	Чумыш	53.80	83.67	1067	479	171	641	686	119	0.65	0.42	0.61
55	Песчаная	52.33	84.98	560	263	122	363	373	82	0.66	0.46	0.64
56	Чулым	56.45	90.45	1128	—	200	644	—	183	0.74	—	0.74

широколиственных лесов (р. Десна), в лесостепи (р. Иртыш у Омска) и в степи (реки Дон, Северский Донец). Большинство участков приходится на Восточно-Европейскую равнину и Западносибирскую низменность; их меньше на низменностях Восточной Сибири (р. Тунг) и в низовьях Яны. Малые староречья видны на притоках верхнего Днепра, Немане, Западном Буге и верхнем Днестре. В Западной Европе малые староречья на поймах рек не выделяются.

Соотношение эффективных ширин древних и современных русел изменяется на разных реках от 0.32 до 0.99. Размеры древних малых русел наиболее существенно отличаются от размеров современных русел в бассейнах Вятки и среднего Иртыша. Крутизна древних излучин на этом этапе повсеместно была больше, чем современных. Прослеживается слабая тенденция к увеличению соотношения крутизны древних и современных излучин на восток и запад от 50° в. д. (табл. 1).

Возраст малых палеорек равнин Северной Евразии определен по немногочисленным имеющимся данным радиоуглеродного и спорово-пыльцевого анализов старичных отложений. Согласно оценке А.В. Чернова и Л.М. Гаррисона [28] малое меандрирующее русло верхней Оби форми-

ровалось 6.5–3.0 тыс. л.н., после чего произошла его трансформация в многорукавное русло. Радиоуглеродные датировки по низовьям Яны [36] указывают на близкий возраст: малое меандрирующее русло формировалось там 7.0–5.4 тыс. л.н. Наиболее подробные геохронологические данные по голоценовой трансформации речных русел имеются по нижней Вычегде [25, 37] и верхней Вычегде [14, 15].

В долине нижней Вычегды, в районе г. Сольвычегодска хорошо сохранились палеорусла всех этапов формирования поймы [25, 37]. На первом этапе формировались большие палеорусла А и Б с излучинами, островами и побочными (рис. 3). Их ширина составляла 1300 м (в расширениях до 1.5 км), шаг излучин основного русла ~6–7 км. Отмирание палеорусла Б началось 8600–8400 л. н. На втором этапе формировались меандрирующие палеорусла В со средней шириной 600 м и шагом излучин 3500 м и Г — с шириной 800 м и шагом излучин 4500 м. Русло В было залено ~8100 л. н.; русло Г было активно 4700–4200 и отмерло ~4000 л.н. На р. Виледи — левом притоке Вычегды — ширина русла и шаг излучин, образованных на втором этапе, 7700 л. н., были в 2.6 раза меньше современных. На третьем этапе

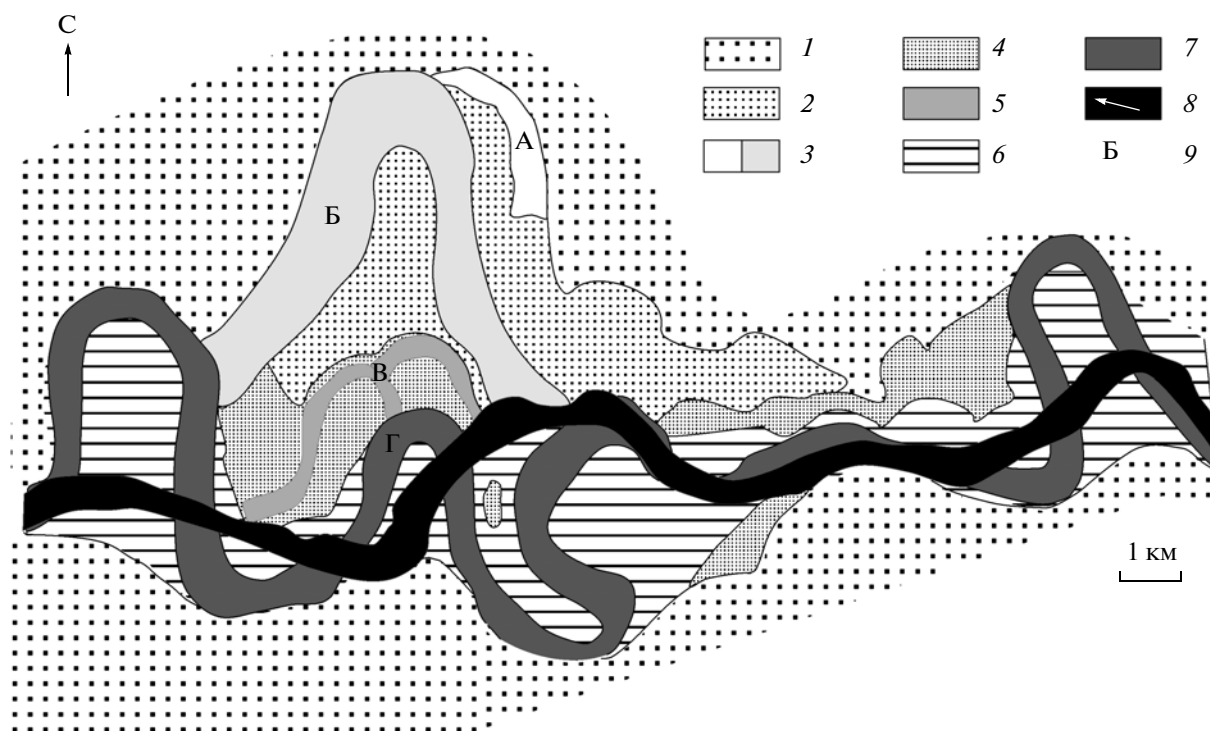


Рис. 3. Схема эволюции русла нижней Вычегды в голоцене. 1 – III аллювиально-дельтовая терраса, 2 – II терраса, 3 – палеоруслу возрастом >9.0 тыс. л. н., 4 – I терраса, 5 – палеоруслу возрастом 8.0–5.5 (?) тыс. л. н., 6 – высокая пойма, 7 – палеоруслу возрастом 5.5 (?) – 2.6 тыс. л. н., 8 – современное русло, 9 – индексы палеорусел.

формируется современное разветвленно-извилистое русло Вычегды. Оно имеет ширину 1100 м, шаг пологих извилин – 6000 м. Русло современного облика начало формироваться не позднее 2600 л.н.

На участке верхней Вычегды ниже устья р. Нем пойма имеет ширину 2.0–3.5 км. Здесь также выделены три возрастные генерации поймы [14]: выровненная пойма с плохо сохранившимся ложбинно-островным первичным рельефом; сегментно-гривистая пойма, образованная в результате миграции малых крутых излучин петлеобразной формы; сегментно-гривистая пойма, образованная при развитии излучин современного русла. Шаг современных излучин больше, чем излучин второго этапа, а их амплитуда меньше. Из датирования палеоруслу этапа формирования малых излучин следует, что на верхней Вычегде этот этап начался ранее 3600 л.н.

На участке Вычегды выше устья Локчима в районе пос. Пезмог часть гривистой поймы сформирована при блуждании древней меандрирующей реки с излучинами, которые существенно меньше и круче, чем у современной реки. Образование одного из наиболее древних фрагментов поймы с малыми староречьями, над которым расположена неолитическая стоянка Пезмог-4, происходило >6700–6800 л.н. [15].

Таким образом, на Вычегде четко выделяется этап формирования меандрирующего русла с меньшими размерами, чем как у более древнего, так и у современного. В низовьях реки ширина этого русла составляла 600 м (в 1.8 раза меньше современной) в начале этапа и 800 м (в 1.4 раза меньше современной) в его конце. Этап существенного уменьшения размеров русла реки и увеличения крутизны излучин охватывал весь атлантический период голоцена и закончился в суббореальном периоде. Минимальные размеры русла реки имели в оптимуме голоцена.

Гидрологические и климатические условия формирования палеорусел нижней Вычегды в голоцене восстановлены на основании детального спорово-пыльцевого анализа датированных флювиальных отложений (рис. 4). При помощи метода ареалограмм для каждой из изученных ископаемых флор были определены территории, где в настоящее время совместно произрастает большинство видов растений [30]. Границы этих территорий были уточнены по данным о составе почвенной акарофауны [31]. Эти территории служат ближайшими современными ландшафтно-климатическими и гидрологическими аналогами для бассейна Вычегды в соответствующие отрезки времени в прошлом.

Для пра-Вычегды времени формирования самого малого палеоруслу “В” гидрологический

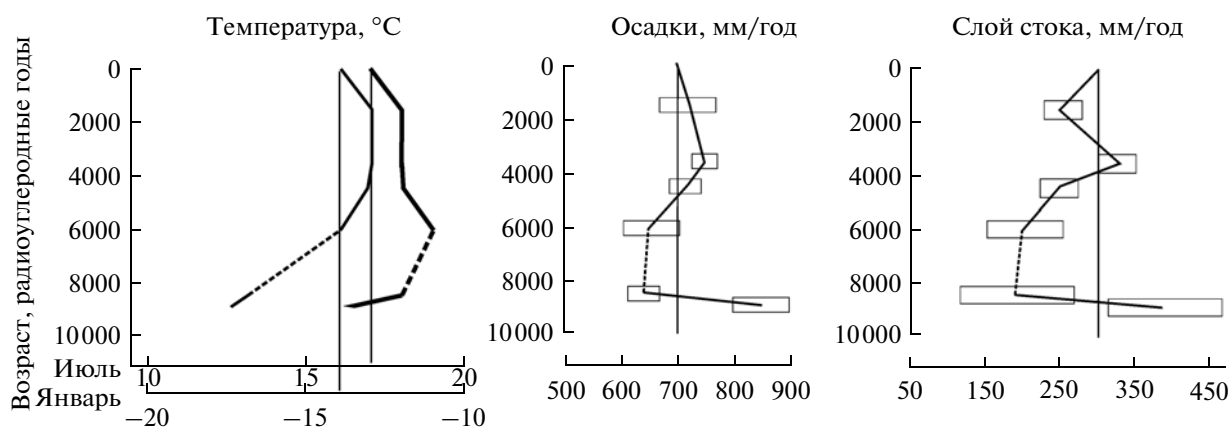


Рис. 4. Гидролого-климатические характеристики для голоцена низовьев Вычегды по данным анализа отложений на пойме у д. Байка. Вертикальные линии соответствуют современным характеристикам. Прямоугольниками показаны диапазоны реконструированных величин и соответствующих радиоуглеродных датировок.

аналог — реки южной тайги в бассейне Вятки. Малые ширина и шаг извилин русла показывают, что водоносность пра-Вычегды была низкой. По данным характеристик региона-аналога палеоклимат характеризовался значительной континентальностью с более высокой (на 2°C) летней температурой воздуха. Слой годовых осадков составлял ~ 650 мм, годовой слой стока ~ 175 мм. Соответствующие современные значения равны 700 и 300 мм (рис. 4). Данные по скоростям накопления пойменного аллювия показывают, что в период между 8000 и 6000 л.н. пойма Вычегды практически не затапливалась. Максимум сухости и минимальный сток воды на Вычегде приходились на ~ 6000 л.н.

Исследования в низовьях Вычегды показывают, что основной причиной формирования малых палеорусел было уменьшение годового слоя стока и среднегодового расхода воды за счет относительно малых осадков и высокого испарения.

СТОК ВОДЫ НА РАВНИНАХ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ В ОПТИМУМ ГОЛОЦЕНА

Если известно соотношение эффективных ширин современного (индекс с) и древнего (индекс д) русел и изменение характера внутригодовой неравномерности стока, то, исходя из формул (1)–(4), отношение средних расходов воды можно вычислить по формуле

$$\frac{\bar{Q}_d}{\bar{Q}_c} = \left(\frac{a_d}{a_c}\right)^{0.73} \left(\frac{\bar{W}_d^*}{\bar{W}_c^*}\right)^{1.36} F^{0.73(n_d - n_c)}. \quad (5)$$

Ширина и шаг излучин русел для этапа малых рек на равнинах Северной Евразии определены по крупномасштабным космическим изображениям (табл. 1). Степень неравномерности стока для периода формирования малых русел для всей этой

территории можно оценить лишь приблизительно. Так как существенной перестройки географической зональности в голоцене не происходило, то зональный коэффициент n в формулах (4)–(5), видимо, слабо менялся во времени. Большая крутизна малых излучин (по сравнению с крутизной современных) свидетельствует об устойчивости поверхности речных пойм этого этапа. Это может указывать на их редкую затопляемость и, следовательно, на малую внутригодовую изменчивость стока. Коэффициент a в формуле (3) увеличивается с уменьшением внутригодовой изменчивости стока, так что отношение $(a_d/a_c)^{0.73}$ в формуле (5) > 1 . Максимальное пространственное соотношение коэффициентов a для современных ландшафтов составляет ~ 2 (рис. 5а в [37]). Исходя из принципа эргодичности в гидрологии [16] это значение будет максимальным и при изменении во времени. Это означает, что уменьшение размера древне-

го русла на 35% и более (т.е. $\left(\frac{\bar{W}_d^*}{\bar{W}_c^*}\right) > 0.74$) можно

объяснить весьма существенным уменьшением внутригодовой изменчивости стока без изменения среднегодового расхода воды. Для нижней Вычегды периода формирования палеорусла Г с крутыми излучинами коэффициент a в формуле (4) равен в среднем 3.7 (при современном значении 3.4). Таким образом, величина соотношения $(a_d/a_c)^{0.73}$ составляет здесь 1.06, и это уже привело к значительному (в 3 раза) изменению крутизны излучин русла (табл. 1).

Это значение $(a_d/a_c)^{0.73}$ использовано для восстановления отношения древнего среднегодового расхода воды к современному расходу для периода формирования малых излучин на всей территории Северной Евразии (рис. 5). Это предполагает, что

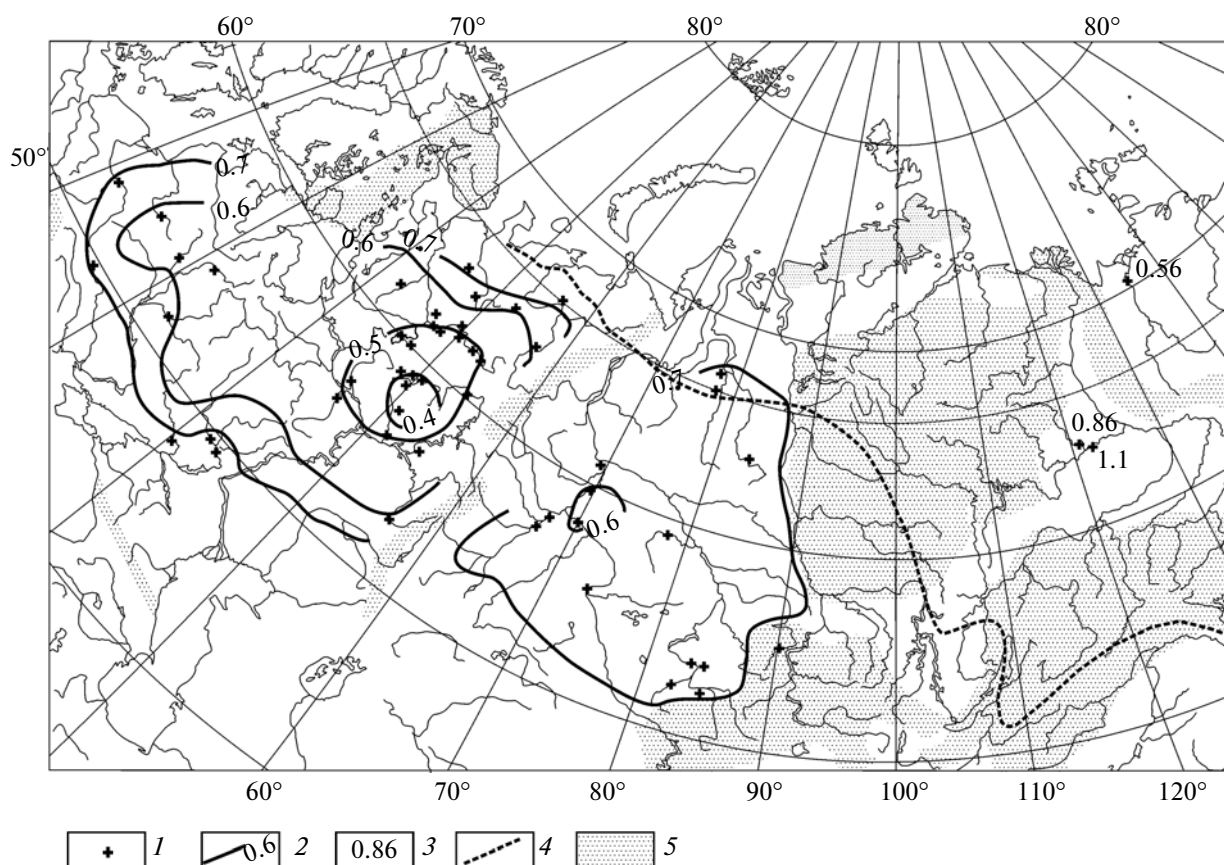


Рис. 5. Распределение соотношения среднеголоценовых и современных среднегодовых расходов воды (в изолиниях) на территории Северной Евразии. 1 – положение участков речных долин с малыми старицами; 2 – изолинии отношений величин древних и современных расходов воды; 3 – отдельные значения отношений величин древних и современных расходов воды; 4 – южная граница сплошной (с отдельными таликами) вечной мерзлоты, к северу от этой линии условия формирования стока воды мало менялись с позднеледниковья; 5 – области ограниченных русловых реформирований, где мало менялась морфология речных русел.

изменение морфометрии речных русел в первую очередь определялось изменением среднегодового расхода воды. Также принята гипотеза, что этап малых рек был общим для этой территории; при этом самые малые русла формировались в оптимуме голоцена, ~6000 л.н.

Широкий пояс относительно пониженного стока рек в оптимуме голоцена был расположен в основном в лесной зоне, с минимумами относительных расходов в бассейнах Вятки (40–50% от современного расхода) и среднего Иртыша. В этом поясе соотношение размеров русел малых рек и современных рек минимально (табл. 1). Здесь различия в морфологии древних и современных русел не могут быть следствием даже весьма значительного уменьшения внутригодовой изменчивости стока.

К северу эти различия уменьшаются, и в зоне тундры изменений в морфологии речных русел и водоносности рек с позднеледниковья до современности не обнаружено. Аналогичная ситуация

характерна для Восточной Сибири – здесь также изменения в морфологии речных русел минимальны. В первую очередь, это связано с большой устойчивостью русел врезанных рек, однако и размеры широкопойменных русел (например, в бассейне Вилюя) менялись мало. В оптимуме голоцена здесь, главным образом, уменьшалась неравномерность стока.

Иная ситуация существовала к югу и западу от области с минимальными относительными расходами воды. На западе и юге Восточно-Европейской равнины и юге Западной Сибири кардинальные изменения условий формирования поверхностного стока воды произошли в начале голоцена при деградации вечной мерзлоты и образовании ландшафтов современного типа. При этом размеры русел малых рек второго этапа уменьшились по сравнению с большими реками первого этапа в 13–15 раз, а среднегодовой сток воды сократился в 4–5 раз. При переходе же к третьему (современному) этапу в суббореальное вре-

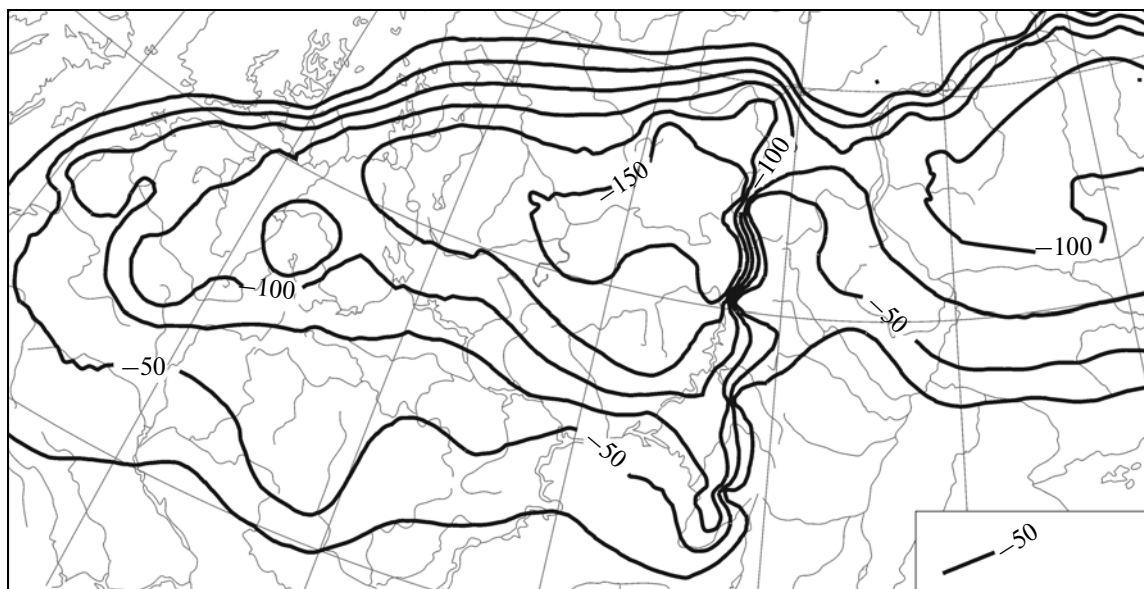


Рис. 6. Отклонения слоя стока в оптимум голоцена от современного, рассчитанные по размерам малых палеорусел. 1 — изолинии разностей слоя стока, мм.

мя размеры русел и водоносность рек в названных регионах увеличились не более чем на 20–30% (рис. 5).

На основании рис. 5 можно составить карту отклонений годового слоя поверхностного стока в оптимум голоцена от современной величины и оценить годовые объемы стока в основных речных бассейнах (рис. 6, табл. 2). На северном мегасклоне Русской равнины сток воды составлял ~180 км³ в год, что на 30% меньше современного стока с той же водосборной площади. В бассейне Волги годовой сток составлял ~134 км³, что почти в два раза меньше современного. Здесь особенно выделяется бассейн Вятки, где сток был на 60% меньше современного. Такой сток Волги вполне объясняет глубокую Мангышлакскую регрессию Каспия, когда

уровень моря опускался до отметки –50 м абс. В бассейнах Дона и Днепра сток в оптимум голоцена был на 40% меньше современного; в бассейне Оби и Иртыша — на 30% меньше, что подтверждается уменьшением темпов торфонакопления в болотах Западной Сибири в позднеатлантическое время [3].

А.В. Беляев и А.Г. Георгиади [1, 6] дали оценку стока рек в оптимум голоцена, базируясь на совершенно другом методе — расчете по уравнению водного баланса на основе реконструкций температур воздуха и осадков, выполненных информационно-статистическим методом по палинологическим данным. Несмотря на использование независимых методов, качественное сходство полученных результатов несомненно: в обоих слу-

Таблица 2. Годовой объем стока голоценовых рек равнин Северной Евразии

Речной бассейн	Современные характеристики		Оптимум голоцена (реконструкция)	V_d/V_c
	площадь водосбора, тыс. км ²	сток V_c , км ³ /год	сток V_d , км ³ /год	
Северная Двина, Мезень и Печора	757	264	181	0.69
Вятка	129	28	11	0.4
Волга	1360	254	134	0.55
Дон	422	29	18	0.62
Днепр	504	54	33	0.61
Обь (с Иртышом)	2990	400	286	0.71
Иртыш	1643	89	64	0.72

чаях для оптимума голоцена выявляется пояс пониженного стока в лесной зоне. Расчет по уравнению водного баланса дал уменьшение стока Волги в оптимум голоцена до 200 км^3 в год [8], что больше оценки авторов статьи (134 км^3). Последние данные об изменениях уровня Каспийского моря в голоцене [34] показывают глубокую регрессию моря в атлантическом периоде, что хорошо согласуется с реконструкциями годового стока Волги.

ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛЫХ ГОЛОЦЕНОВЫХ ПАЛЕОРУСЕЛ

По мнению исследователей палеоклиматов [2, 5, 38] оптимум голоцена представлял собой климатический аналог глобального антропогенного потепления при увеличении средней температуры на 1°C . Если принять эту гипотезу, то результаты палеогидрологических исследований для этого периода (рис. 6, табл. 2) могут быть использованы при разработке сценариев изменения водоносности и режима рек для середины XXI в. Даже противники гипотезы признают полезность такого подхода как дополнения к расчетам по физическим моделям [13].

Изменение водоносности и гидрологического режима рек Северной Евразии за последние десятилетия зафиксировано многими исследователями. Показано общее снижение внутригодовой неравномерности стока за счет увеличения стока межени как на фоне общего уменьшения годового стока (бассейны Днепра и Дона), так и на фоне его увеличения (бассейн Волги и др.) [29]. И в том, и в другом случае складываются условия, благоприятные для уменьшения размеров речных русел, особенно в регионах с уменьшением годового стока.

Обработка данных прогнозного моделирования циркуляции атмосферы для условий антропогенного увеличения содержания парниковых газов в тропосфере [9, 18] в зависимости от выбранной модели или их ансамбля дает существенный разброс прогнозных оценок годового стока основных рек России как по величине, так и по знаку изменения при общем уменьшении внутригодовой изменчивости стока.

Даже при оптимистичных сценариях изменения водных ресурсов вероятность уменьшения размеров речных русел и увеличения крутизны речных излучин достаточно велика. Увеличение ширины пояса меандрирования и изменение положения зон размыва речных берегов скажутся на всех отраслях хозяйства, связанных с использованием русел рек и прирусловых областей. Можно ожидать изменений условий судоходства, работы гидротехнических и инженерных сооружений, увеличения угрозы разрушения построек на речных берегах. Если же оптимум голоцена представлял собой климатический аналог глобального ан-

тропогенного потепления, то уменьшение водных ресурсов произойдет в обширных регионах, в основном в лесной зоне. Наиболее существенными последствиями этого будут изменения режима солености и уровней Черного и Каспийского морей, вплоть до полного осушения современной акватории Северного Каспия.

ВЫВОДЫ

В формировании гравистых пойм меандрирующих рек равнин Северной Евразии выделяется три этапа: деятельности рек большего размера, чем современные; рек меньше современных; рек современного морфодинамического типа.

Радиоуглеродные датировки показывают, что второй этап формирования пойм реками с руслами существенно меньших размеров и значительной крутизной излучин занимает атлантический период голоцена с минимумом размеров русел в оптимум голоцена ~ 6000 радиоуглеродных л.н.

С помощью методов палеогидрологического гидравлико-морфометрического анализа с учетом палеогеографической аналогии на основании данных об изменении размеров речных русел и характеристик палеоландшафтов рассчитаны соотношения палео- и современных расходов, построена карта отклонений слоя стока в оптимум голоцена от современного и оценены изменения объема стока воды.

Выявлено общее значительное снижение речного стока в оптимум голоцена. Наибольшее снижение стока воды происходило в лесной зоне. В бассейнах Вятки и среднего Иртыша расходы воды составляли 40–50% современных. На северном мегасклоне Русской равнины сток воды в оптимум голоцена составлял $\sim 180 \text{ км}^3$ в год, что на 30% меньше современного с той же водосборной площади; в бассейне Волги — $\sim 134 \text{ км}^3$ в год, что почти в два раза меньше современного; в бассейнах Дона и Днепра — на 40, Оби и Иртыша — на 30% меньше современного.

Если принять гипотезу, что оптимум голоцена представлял собой климатический аналог глобального антропогенного потепления, то сделанные оценки для оптимума голоцена можно рассматривать в качестве одного из сценариев снижения водных ресурсов Северной Евразии в середине XXI в. С ним будут связаны изменения условий судоходства, работы гидротехнических и инженерных сооружений, увеличение угрозы разрушения построек на речных берегах, изменение режима солености и уровней Черного и Каспийского морей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляев А.В., Георгиади А.Г.* Средний годовой сток в оптимумы последнего межледниковья и голоцена // Палеоклиматы и палеоландшафты внетропического пространства северного полушария. М.: ГЕОС, 2009. С. 29–30.
2. *Борзенкова И.И.* Эмпирическая палеоклиматология: состояние проблемы и методы исследования // Изменения климата и их последствия. СПб.: Наука, 2002. С. 75–92.
3. *Борисова О.К., Зеликсон Э.М., Кременецкий К.В., Новенко Е.Ю.* Ландшафтно-климатические изменения в Западной Сибири в позднеледниковье и голоцене в свете новых палинологических данных // Изв. РАН. Сер. геогр. 2005. № 6. С. 38–49.
4. *Варущенко С.И., Варущенко А.Н., Клиге Р.К.* Изменение режима Каспийского моря и бессточных водоемов в палеовремении. М.: Наука, 1987. 255 с.
5. *Величко А.А.* Глобальные изменения климата и реакция ландшафтной оболочки // Изв. РАН. Сер. геогр. 1991. № 5. С. 5–24.
6. *Величко А.А., Беляев А.В., Климанов В.А., Георгиади А.Г.* Реконструкция климатических условий и речного стока северного полушария в оптимумы микулинского межледниковья и голоцена // Вод. ресурсы. 1992. № 4. С. 34–42.
7. *Величко А.А., Климанов В.А.* Климатические условия Северного полушария 5–6 тыс. л. н. // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1990. № 5. С. 38–52.
8. *Величко А.А., Климанов В.А., Беляев А.В.* Реконструкция стока Волги и водного баланса Каспия в оптимумы микулинского межледниковья и голоцен // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1988. № 1. С. 27–37.
9. *Водные ресурсы России и их использование* / Под ред. Шикломанова И.А. СПб.: ГГИ, 2008. 598 с.
10. *Волков И. А.* К истории речных долин юга Западно-Сибирской низменности // Четвертичная геология и геоморфология Сибири. Новосибирск: Наука, 1962. С. 34–47.
11. *Георгиади А.Г., Милукова И.П.* Речной сток в бассейнах крупнейших рек южного склона Русской равнины в позднеатлантический оптимум голоцена // Изв. РАН. Сер. геогр. 2007. № 4. С. 113–124.
12. *Гричук В.П.* Опыт реконструкции некоторых элементов климата Северного полушария в атлантический период голоцена // Голоцен. М.: Наука, 1969. С. 41–57.
13. *Дроздов О.А.* О надежности использования аналогов прошлого для прогнозов водного режима на будущее // Вод. ресурсы. 1992. № 4. С. 7–12.
14. *Зарецкая Н.Е., Панин А.В., Сидорчук А.Ю. и др.* Динамика верхней Вычегды во второй половине голоцена (по аналитическим и геоморфологическим данным) // Матер. V Всерос. совещ. по изуч. четвертичного периода. М.: ГЕОС, 2007. С. 130–133.
15. *Зарецкая Н.Е., Чернов А.В., Карманов В.Н. и др.* Опыт реконструкции истории долины средней Вычегды в позднеледниковье и голоцене по результатам комплексных исследований // Матер. VI Всерос. совещ. по изуч. четвертичного периода. Новосибирск: СО РАН, 2009. С. 223–226.
16. *Калинин Г.П.* Пространственно-временной анализ и эродичность гидрологических элементов // Вестн. МГУ. Сер. 5, География. 1966. № 5. С. 19–34.
17. *Кислов А.В.* Математическое моделирование климата оптимума голоцена // Изв. РАН. Сер. физика атмосферы и океана. 1993. Т. 2. № 7. С. 705–713.
18. *Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М. и др. А.Н.* Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. М.: Макспресс, 2008. 290 с.
19. *Лемешко Н.А.* Изменение составляющих водного баланса суши при глобальном потеплении на 1°C // Вод. ресурсы. 1992. № 4. С. 64–70.
20. *Маккавеев Н.И., Хмелева Н.В., Гунн Го-юань.* Изменения в рисунке меандр, обнаруженные на некоторых реках // Экспериментальная геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 1969. Вып. 2. С. 52–62.
21. *Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Чернов А.В.* Основные этапы формирования пойм равнинных рек Северной Евразии // Геоморфология. 2011. № 3. С. 20–31.
22. *Сидорчук А.Ю., Борисова О.К., Панин А.В.* Поздневалдайские палеоруслы рек Русской равнины // Изв. РАН. Сер. геогр. 2000. № 6. С. 73–78.
23. *Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К.* Позднеледниковые палеоруслы рек Западной Сибири // Изв. РАН. Сер. геогр. 2008. № 2. С. 67–75.
24. *Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К.* Климатически обусловленные изменения речного стока на равнинах северной Евразии в позднеледниковье и голоцене // Вод. ресурсы. 2008. Т. 35. № 4. С. 406–416.
25. *Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Чернов А.В. и др.* Сток воды и морфология русел рек Русской равнины в поздневалдайское время и в голоцене (по данным палеоруслового анализа) // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 2000. Вып. 12. С. 196–230.
26. *Тарасов П.Е., Гунова В.С., Успенская О.Н.* Уровни озер бассейна Волги как индикатор изменения климата в голоцене // Вестн. МГУ. Сер. 5, География. 1997. № 3. С. 36–41.
27. *Хотинский Н.А., Савина С.С.* Палеоклиматические схемы территории СССР в бореальном, атлантическом и суббореальном периодах голоцена // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1985. № 4. С. 18–34.
28. *Чернов А.В., Гarrisон Л.М.* Палеогеографический анализ развития русловых деформаций широкопойменных рек в голоцене (на примере верхней и средней Оби) // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1981. Т. 5. Вып. 4. С. 16–21.
29. *Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю.* Влияние антропогенных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы // Изменения климата и их последствия. СПб.: Наука, 2002. С. 152–164.

30. *Borisova O.K.* The Holocene flora and vegetation of the northern Russian Plain (the Vychegda River basin) // *Acta Palaeontologica Sinica*. 2002. V. 41. P. 478–486.
31. *Borisova O.K., Sidorchuk E.A.* Vegetation and climate changes in the northern Russian Plain during the Holocene // *Man and environment in boreal forest zone: past, present and future*. Moscow: Inst. Geogr. RAS, Inst. Ecol. Evolution RAS, 2008. P. 26–28.
32. *Dury G. H.* Contribution to a general theory of meandering valleys // *Am. J. Sci.* 1954. V. 252. № 4. P. 231–265.
33. *Harrison S.P., Yu G., Tarasov P.E.* Late Quaternary lake-level record from northern Eurasia // *Quaternary Research*. 1996. V. 45. № 2. P. 138–159.
34. *Overeem I., Kroonenberg S.B., Veldkamp A. et al.* Small-scale stratigraphy in a large ramp delta: recent and Holocene sedimentation in the Volga delta, Caspian Sea // *Sedimentary Geology*. 2003. V. 159. P. 133–157.
35. *Sidorchuk A.Yu., Borisova O.K.* Method of paleogeographical analogues in paleohydrological reconstructions // *Quaternary International*. 2000. V. 72. № 1. P. 95–106.
36. *Sidorchuk A., Panin A., Borisova O.* The Lateglacial and Holocene Palaeohydrology of Northern Eurasia // *Palaeohydrology: Understanding Global Change*. Chichester: John Wiley and Sons, 2003. P. 61–75.
37. *Sidorchuk A., Panin A., Borisova O., Kovalyukh N.* Lateglacial and Holocene palaeohydrology of the lower Vychegda river, western Russia // *River Basin Sediment Systems: Archives of Environmental Change*. Amsterdam: A.A. Balkema Publ., 2001. P. 265–295.
38. *Velichko A.A., Borisova O.K., Zelikson E.M. et al.* Greenhouse warming and the Eurasian biota: are there any lessons from the past? // *Global Planetary Change*. 1993. V. 7. P. 51–67.