



УДК 556.522 (1-925.16)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.48.3>

Структурно-гидрографический подход к определению областей формирования стока рек бассейна оз. Байкал в период максимальной и экстремальной водности

И. Ю. Амосова, Е. А. Ильичева*

*Институт географии им. В. Б. Сочавы, г. Иркутск, Россия
Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*

Аннотация. Исследование направлено на определение роли звеньев русловой сети каждого уровня в процессе формирования стока и особенности его водного режима для речных систем бассейна оз. Байкал, имеющих систематические (более 30–40 лет) наблюдения за стоком воды на стандартной сети Росгидромета. Структурно-гидрографический анализ речных систем проведен при сравнении результатов моделирования: динамического при максимальном увлажнении и статического по среднемноголетнему стоку. На основе физико-географического районирования бассейна оз. Байкал выделены провинции и межгорные зоны, которые дренируются речными системами, характеризующимися специфическими условиями стокообразования. По динамической и статической моделям проведена количественная оценка постоянных, временных и эпизодических устьев водотоков, непосредственно впадающих в оз. Байкал. Дана оценка насыщенности речных систем водотоками каждого порядка. На основе структурно-гидрографического подхода строения речных систем выделены области формирования, транзита и аккумуляции стока. Результаты исследования легли в основу создания картосхемы пространственно-типологического распределения речных систем бассейна оз. Байкал по областям стока, что в свою очередь актуально для получения дополнительной информации с целью анализа стока неизученных рек и расчета экстремальной водоносной способности речных систем.

Ключевые слова: область формирования стока, область транзита стока, область аккумуляции стока, речная система, структурный анализ.

Благодарности. Исследование выполнено за счет средств государственного задания № АААА-А21-121012190059-5.

Для цитирования: Амосова И. Ю., Ильичева Е. А. Структурно-гидрографический подход к определению областей формирования стока рек бассейна оз. Байкал в период максимальной и экстремальной водности // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2024. Т. 48. С. 3–24. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.48.3>

Original article

Structural-Hydrographic Approach to River Flow Formation Areas Determining in the Baikal Basin During Periods of Maximum and Extreme Water Content

I. Y. Amosova, E. A. Illicheva*

*V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russian Federation
Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation*

Abstract. The research is carried out determining the role of each link of channel network in the flow formation process and the water regime features for the river systems in the Lake Baikal basin. The period of regular water flow observations is at least 30 years. The structural and hydrographic analysis of river systems made on the basis of comparison of the results of dynamic and static modeling. The dynamic model corresponds to extreme water content, the static model – on the long-time average annual flow. Provinces and intermountain zones were defining based on physical and geographical zoning. The river systems have specific characteristics of flow formation in these zones. The number of permanent, temporary and episodic river mouths flowing into the Baikal are estimated. The power (magnitude) of each elementary link of the river system is estimated. The regions of formation, transit, and accumulation of flow are defined based on the regularities of the structure of the water-erosion network. The map of the spatial and topological distribution of the river systems by flow regions is created based on the results of the research. This research is relevant for obtaining additional information in order to analyze the flow and calculate the maximum water-bearing capacity of river systems.

Keywords: regions of formation of flow, regions of transit of flow, regions of accumulation of flow, river systems, structural analysis.

For citation: Amosova I.Y., Illicheva E.A. Structural-Hydrographic Approach to River Flow Formation Areas Determining in the Baikal Basin During Periods of Maximum and Extreme Water Content. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2024, vol. 48, pp. 3-24. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.48.3> (in Russian)

Введение

Речной сток формируется под влиянием сложного взаимодействия физико-географических факторов. Влияние таких, как рельеф, морфометрические характеристики реки и ее бассейна, а также строение русловой сети, на формирование максимального стока может быть преобладающим.

Особенности геолого-тектонического и геоморфологического строения водосборов отражаются в рисунке речной сети, который описывается совокупностью структурно-гидрографических и морфометрических параметров. Структурно-гидрографический подход к изучению речных систем (РС) позволяет разделить бассейн на области формирования, транзита и аккумуляции стока.

В гидрологических исследованиях деление речного бассейна по областям стокоформирования традиционно опирается на субъективные признаки, чаще определяемые увеличением объемов местного стока. Б. И. Гарцман [2008] предложил структурно-гидрографический подход для обоснования выделения областей формирования, транзита и аккумуляции стока. Опыт исследований речных систем дальневосточного региона перенесен в данной работе на бассейн оз. Байкал, включая его монгольскую часть. Цель заключается в дифференцировании суббассейнов речных систем рассматриваемой территории по областям стока в условиях неравномерного и дефицитного обеспечения гидрологической информацией. Для ее реализации ключевой задачей было определение роли каждого звена русловой сети в формировании стока.

Посредством автоматизированной обработки покрытий цифровой модели рельефа SRTM бассейна оз. Байкал выполнено новое определение его

границ. Добавляется засушливая территория, в пределах которой на топографической карте местами показаны небольшие бессточные озера или временные водотоки. В разных источниках площадь бассейна Байкала приводится в диапазоне 541 000 км² [Государственный доклад ... , 2023] – 556 522 км² (без акватории оз. Байкал)¹. В данной статье принята площадь 540 480 км², определенная авторами.

Область формирования стока (ОФС) приурочена к приводораздельным (верхним) частям речного бассейна. Представлена водно-эрозионной сетью и поверхностями склонов малых водосборов, на которых происходит интенсивное наращивание порядка по длине реки и формирование поверхностного стока. Суммарное количество входов (водотоков первого порядка), или верхних звеньев речной сети, выражается в значениях магнитуды, представляющей мощность внешнего отдела речной системы.

Ниже располагается область транзита стока (ОТС) с выраженной главной рекой с крупными притоками ближайших младших порядков большей протяженности и меньшим количеством звеньев элементарной сети водотоков. Таким образом, при переходе от области формирования к области транзита стока сокращается количество водотоков первого порядка.

Область аккумуляции стока (ОАС) занимает часть водосбора в нижнем течении реки с малыми притоками, несопоставимыми с главной рекой порядками, местный сток в этой области практически не формируется.

В период максимального увлажнения речная система области формирования стока увеличивается за счет вовлечения в систему большего количества элементарных водотоков, т. е. множество временных и эпизодических рек подключаются к флювиальной системе, увеличивая сток в нижерасположенных областях.

Материалы и методы

Исследование проведено для речных систем бассейна оз. Байкал, обеспеченных систематическими наблюдениями за стоком воды, продолжительностью рядов 30–40 лет и более. Использовались данные по 115 гидрологическим постам, 100 из них расположены на территории РФ, 15 – на монгольской части бассейна [Ресурсы поверхностных вод ... , 1973; Гармаев, 2010]. Выявление закономерностей формирования стока осложняется дефицитом гидрологических данных и неравномерностью расположения пунктов наблюдений по бассейну оз. Байкал.

В качестве картографических исходных данных использовались материалы цифровой базы высот Земли [SRTM 90 ...] и топографические карты масштаба 1:200 000. Покрытие модели высот и топокарт на исследуемую территорию перепроецировано в эквидистантную проекцию (Albers_Equal_Area_Conic).

Методика определения структурно-гидрографического строения русловой сети бассейна оз. Байкал опирается на многочисленные работы изучения

¹ Паспорт Байкала. Министерство природных ресурсов и экологии Республики Бурятия. URL: https://burpriroda.ru/burpriroda/buryatiya/about_baikal.php?ELEMENT_ID=28982 (дата обращения: 29.02.2024)

структуры речных систем, применяемые в геоморфологических и гидрологических исследованиях [Гарцман, Казанский, Корытный, 1976; Ржаницын, 1960; Философов, 1960; Scheidegger, 1964; Fluvial morphometry ... , 2016; Martins, Gadiga, 2015; Montgomery, Fofoula-Georgiou, 1993; O'Callaghan, Mark, 1984; A GIS-based approach ... , 2017; Rodrigues-Iturbe, Rinaldo, 1997; Tests of peak ... , 2001; Tribhuvan, Sonar, 2016; Vittala, Govindaiah, Gowda, 2004; Waikar, Nilawar, 2014; Zende, Nagarajan, Atal, 2012]. Порядок речных систем определялся по классификации Хортон – Стралера [Horton, 1945; Strahler, 1952]. Структурно-гидрографический анализ РС выполнен на основе сравнения результатов статического и динамического моделирования [Амосова, Ильичева, 2020]. Статическая модель соответствует среднесуточному стоку и представляет собой графическое изображение постоянно действующей речной сети (граф – ордерев), построение графа выполнено по топографическим картам. Динамическая модель создана по цифровой модели высот и представляется в виде графа тальвегов водно-эрозионной сети, возникающей в условиях экстремального увлажнения.

Основой для выделения областей стока послужила динамическая модель, при этом учитывался рисунок русловой сети, уклоны и высота водосборов.

В рамках структурного подхода под областью формирования стока подразумевается часть водосбора до узла образования речной системой высшего порядка [Гарцман, 2008]. Соединяя точки высшего порядка, по главной реке и на притоках, берущих начало на приводораздельной территории, проводим нижнюю границу ОФС. Бассейн Байкала характеризуется сложной геологической историей, различным литологическим составом горных пород, преимущественно горным рельефом, особенностями структур горно-складчатой области. В ряде случаев отмечается смещение нижней границы ОФС вниз по течению или вверх по течению до образования ближайших младших порядков, когда приток равнозначен по мощности и строению. В таких случаях граница между ОФС и ОТС выбиралась в узле слияния долин и проводилась по местному субводоразделу. В качестве примера можно привести р. Бугульдейку и ее правый приток р. Куртун (рис. 1).

При переходе от области формирования к области транзита стока сокращается количество элементарных водотоков, допустимо наличие протяженных водотоков с относительно низким порядком и характерным перистым рисунком речной сети. Место впадения последнего притока ближайшего младшего порядка (относительно речной системы в целом) соответствует нижней границе ОТС.

Область аккумуляции стока расположена в нижних частях водосборов между устьем водотока и границей ОТС. В силу выполаживания продольного профиля нижнего течения в устьевых областях не формируются большие объемы местного стока, а происходит разгрузка водных масс всего бассейна.

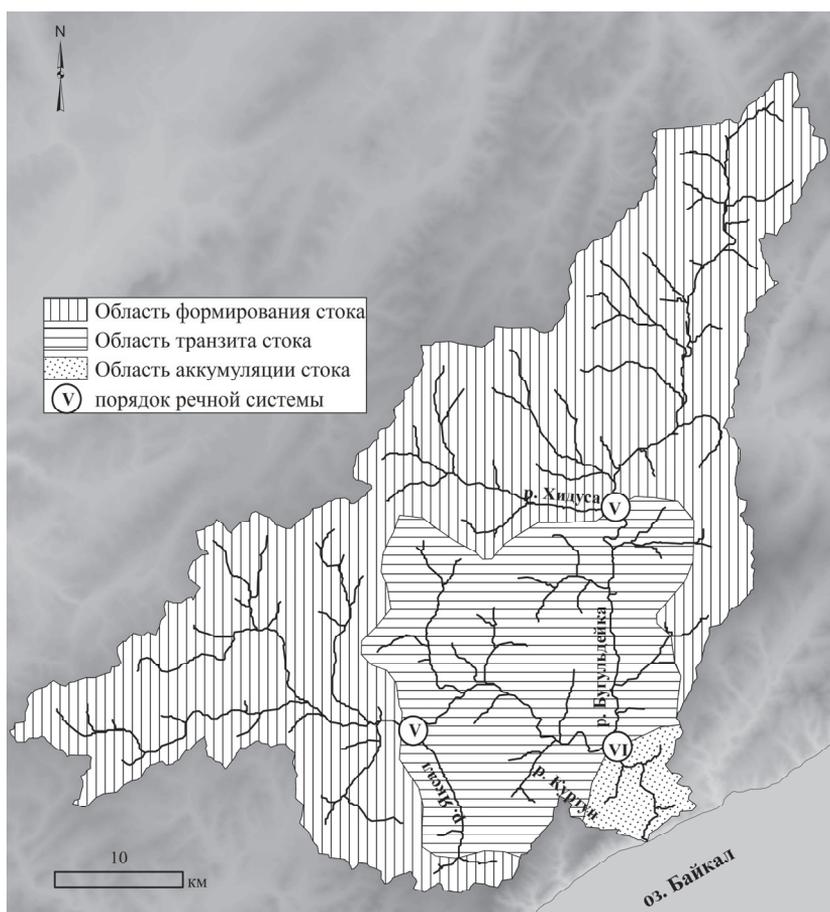


Рис. 1. Определение границ областей стока в бассейне р. Бугульдейки

Оценку насыщенности однофункциональными потоками речной системы можно выразить через мощность (магнитуду) [Schreve, 1967], которая определяется как сумма внешних водно-эрозионных звеньев, заключенных между истоком и самой первой точкой слияния элементов (водно-эрозионные элементы 1-го порядка). Максимальная магнитуда, или мощность, нарастает к устьевому звену, и всей речной системе присваивается это значение, определяя тем самым важность каждого звена.

Для описания внутренней структуры графа – ордерера РС применяется суммарная энтропия [Гарцман, Казанский, Кoryтный, 1976], учитывающая количество элементов в структуре, их распределение и взаимосвязь, и вычисляется по формуле Шеннона [Гарцман, 2008]:

$$H = -p_1 \log_2 p_1 - p_2 \log_2 p_2, \quad (1)$$

где H – энтропия, бит; $p_1 = S_1 / (S_1 + S_2)$, $p_2 = S_2 / (S_1 + S_2)$; S_1 и S_2 – количество водно-эрозионных элементов 1-го порядка для двух сливающихся водотоков.

Результаты и обсуждение

Бассейн Байкала имеет хорошо развитую речную сеть. Количество байкальских устьев составляет 959, из них постоянных водотоков, имеющих сток в межень, – 230; временных водотоков (элементы 2-го порядка со средней длиной тальвегов до 1,5 км, сток воды в которых происходит меньшую часть года) – 175; эпизодических водотоков (водно-эрозионные элементы 1-го порядка, в том числе пади, распадки и др., с длиной тальвегов от 120 м до 1,5 км и осуществляющие сток при максимальном и экстремальном увлажнении) – 554.

Стоит отметить, что сток многих рек осуществляется в осадочной толще устьевых областей и достигает Байкала подземным (подрусловым) путем [Зекцер, Джамалов, Месхетели, 1984]. Сравнительный анализ статической и динамической моделей показал, что для таких участков характерны водотоки со слепыми устьями, отсутствием области аккумуляции (поверхностной), в результате чего происходит недоучет поверхностного стока.

На основе физико-географического районирования [Гвоздецкий, Михайлов, 1978] бассейна оз. Байкал выделены провинции и межгорные зоны, которые дренируются РС, имеющие специфические характеристики стокоформирования. В горах Южной Сибири выделяются следующие РС: Приморского хребта, Байкальского хребта, реки, дренирующие северо-западные склоны хребтов Хамар-Дабан и Улан-Бургасы, западные склоны Баргузинского хребта [Амосова, Ильичева, 2020]. Отдельные зоны составляют РС бассейнов р. Селенги, Баргузина, Верхней Ангары (РС тектонических котловин), а также реки, берущие начало на Олхинском плато.

Площади областей стока в бассейне оз. Байкал составляют: ОФС – около 300 тыс. км² (52 %), из них 46 % (264 тыс. км²) приходится на РС Селенги (табл. 1), ОТС – около 200 тыс. км² (33,7 % от общей площади водосборного бассейна), из них 29 % (около 170 тыс. км²) расположено в суббассейне р. Селенги, ОАС – 38 тыс. км² (7 % от общей площади водосборного бассейна), из них 5 % – в суббассейне р. Селенги.

Наибольший вклад в ОФС оз. Байкал приносят речные системы р. Селенги по причине значительной площади и полизональности физико-географических условий самого бассейна, а также РС Баргузина и Верхней Ангары (табл. 1, рис. 2). Наименьший вклад в формирование стока у речных систем, дренирующих западный склон Баргузинского хребта и Олхинского плато.

Таблица 1

Соотношение площади областей стока в бассейне оз. Байкал

Речные системы	Площадь ОФС, %		Площадь ОТС, %		Площадь ОАС, %	
	от общей площади бассейна оз. Байкал	внутри зоны	от общей площади бассейна оз. Байкал	внутри зоны	от общей площади бассейна оз. Байкал	внутри зоны
Приморского хребта	0,56	54	0,34	32	0,14	13
Байкальского хребта	0,55	74	0,17	22	0,03	4
Тектонических котловин	3,43	47	2,49	34	1,4	19
Баргузинского хребта (западные склоны)	0,16	48	0,14	42	0,03	9

Окончание табл. 1

Речные системы	Площадь ОФС, %		Площадь ОТС, %		Площадь ОАС, %	
	от общей площади бассейна оз. Байкал	внутри зоны	от общей площади бассейна оз. Байкал	внутри зоны	от общей площади бассейна оз. Байкал	внутри зоны
Хребта Улан-Бургасы (северо-западные склоны)	0,65	43	0,69	45	0,18	12
Хребта Хамар-Дабан (северо-западные склоны)	0,82	53	0,65	42	0,07	5
Олхинского плато	0,04	69	0,02	23	0,005	8
Селенга	46	57	29	37	5	6

К основным зонам повышенного стокоформирования относятся речные системы хребтов Хамар-Дабан и Улан-Бургасы. Аналогичное распределение и для ОТС. Область аккумуляции стока относительно всего бассейна оз. Байкал незначительна, в единичных случаях отсутствует. По причине отсутствия наблюдательной сети более 7 % площади бассейна Байкала в анализе не учитывались.

При рассмотрении отношения области стока к площади всей зоны выделены подгруппы:

– область формирования стока: 1) менее 50 % – речные системы хр. Улан-Бургасы, западных склонов Баргузинского хребта, речные системы тектонических котловин; 2) 50–60 % – речные системы Селенги, хр. Хамар-Дабан, Приморского хребта; 3) более 60 % – РС Байкальского хребта, Олхинского плато;

– область транзита стока: 1) менее 30 % – речные системы Байкальского хребта; 2) 30–40 % – РС тектонических котловин, Баргузинского и Приморского хребтов, Олхинского плато, Селенги; 3) более 40 % – речные системы хребтов Хамар-Дабан и Улан-Бургасы;

– область аккумуляции стока: 1) менее 10 % – речные системы Байкальского, Баргузинского хребтов, Селенги, хр. Хамар-Дабан, Олхинского плато; 2) 10–20 % – РС хр. Приморского и Улан-Бургасы; 3) более 20 % – речные системы тектонических котловин.

Необходимым условием формирования стока является уклон. Поэтому крутизна склонов, их протяженность и расчлененность рельефа являются важнейшими характеристиками возникновения поверхностного стока, а также определяющими потенциальную опасность проявления эрозионных процессов. Чем круче склон, тем больше скорость стекания и меньше время взаимодействия подстилающей поверхности с данным объемом воды. Поэтому с увеличением крутизны склона уменьшается стокорегулирующая роль подстилающей поверхности [Антипов, Федоров, 2000], и возрастает доля трансформации осадков непосредственно в сток.

Для рассматриваемых зон определены: диапазон высот и уклона поверхности водосбора и тальвегов в областях стокоформирования (табл. 2, 3). Высота поверхности водосбора в среднем по всему бассейну в ОФС составляет 1220 м, с максимальной высотой 3539 м в бассейне р. Орхон; 1000 м в ОТС и 800 м в ОАС. Средняя высота тальвегов по всему бассейну до 1100 м в ОФС, 800 м в ОТС и 580 м в ОАС.

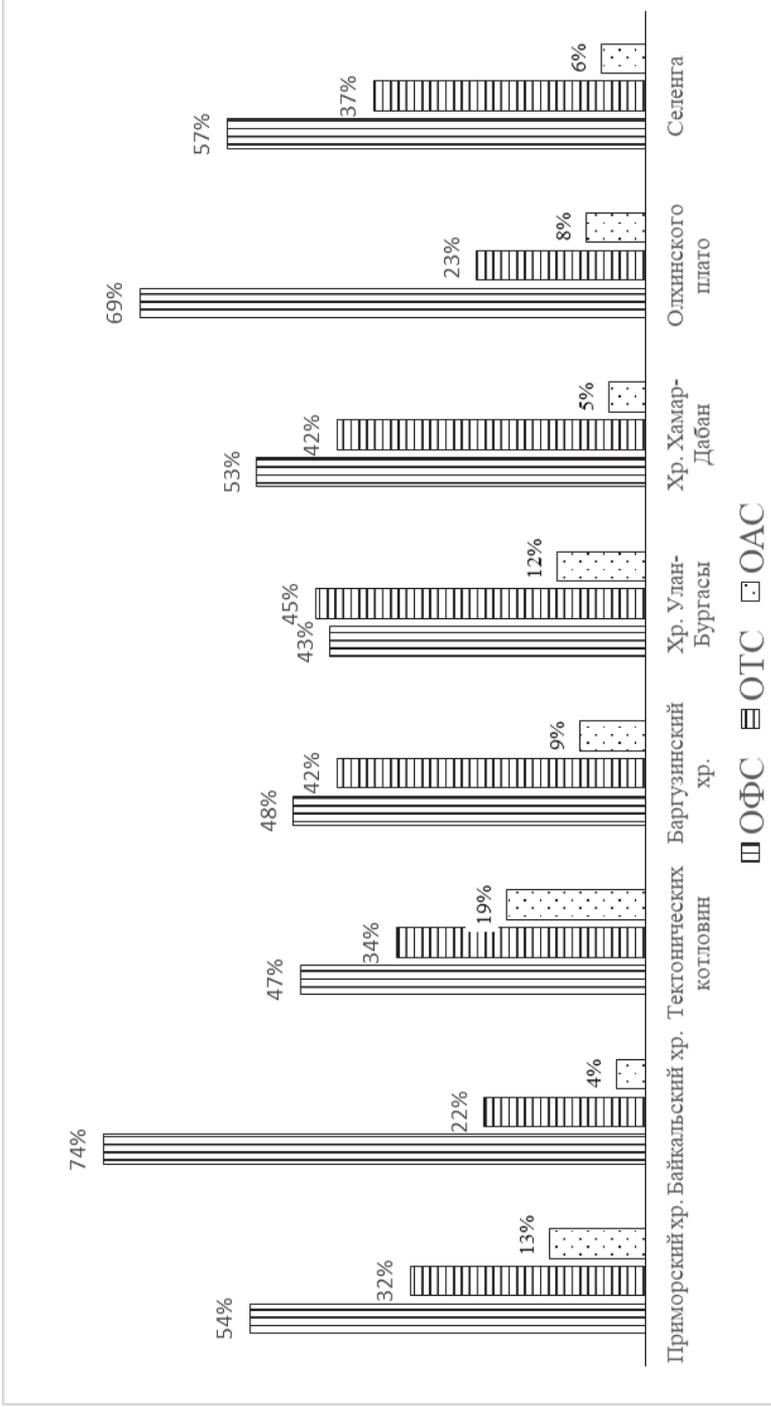


Рис. 2. Площади областей стока в бассейне оз. Байкал

Таблица 2

Абсолютные высоты поверхности водосбора и тальвегов

Речные системы	Поверхность водосбора, м						Тальвеги, м					
	ОФС		ОТС		ОАС		ОФС		ОТС		ОАС	
	max	ср.	max	ср.	max	ср.	max	ср.	max	ср.	max	ср.
Приморского хребта	1638	872	1371	811	1651	772	1395	814	1205	715	1319	663
Байкальского хребта	2466	1220	2122	966	1764	651	1833	1032	1750	803	1168	559
Тектонических котловин	2674	1134	2797	858	2148	513	2199	1038	2174	734	1626	500
Баргузинского хребта (западные склоны)	2628	1147	2354	897	1990	569	2073	1005	1889	767	1607	532
Хребта Улан-Бургасы (северо-западные склоны)	1909	881	2016	797	1731	564	1740	825	1675	671	1410	526
Хребта Хамар-Дабан (северо-западные склоны)	2384	1130	2263	1244	1982	1112	2168	988	1871	738	1535	567
Ольгинского плато	1194	740	1358	737	864	617	1079	697	1180	656	734	547
Селенга	3539	1215	3202	1015	2611	809	3175	1134	2888	953	2432	761

Таблица 3

Уклон поверхности водосбора и тальвегов

Речные системы	Поверхность водосбора, °						Тальвеги, °					
	ОФС		ОТС		ОАС		ОФС		ОТС		ОАС	
	max	ср.	max	ср.	max	ср.	max	ср.	max	ср.	max	ср.
Приморского хребта	22	4	25	5	20	6	19	2	20	4	21	3
Байкальского хребта	33	9	30	9	29	4	26	4	27	5	22	2
Тектонических котловин	36	10	36	8	27	1	31	5	31	3	20	<1
Баргузинского хребта (западные склоны)	35	8	32	7	25	3	24	4	24	4	22	2
Хребта Улан-Бургасы (северо-западные склоны)	24	5	24	6	26	4	22	3	23	3	20	2
Хребта Хамар-Дабан (северо-западные склоны)	30	9	33	8	31	6	24	4	23	4	19	3
Ольгинского плато	20	4	19	5	22	6	12	2	11	2	12	3
Селенга	34	5	29	4	26	3	25	2	24	2	26	1

Уклон поверхности водосбора в ОФС не превышает в среднем по всему бассейну 10° (максимальный 36° – бассейн р. Баргузин), в ОТС – 9° (максимальный 36° – бассейн р. Баргузин), снижаясь до $1\text{--}6^\circ$ в ОАС (максимальный 31° – бассейн р. Утулик). Уклон тальвегов в среднем в ОФС составляет 3° (мах 31° – р. Баргузин), в ОТС – 3° (максимальный 31° – р. Баргузин) и в ОАС – 2° (максимальный 26° – р. Эгийн-Гол). По классификации склонов по крутизне [Заславский, 1983] тальвеги относятся к слабопологим в ОАС, слабопологим и пологим в ОФС и ОТС. В бассейне р. Баргузин в ОФС и ОТС и в бассейне р. Эгийн-Гол в ОАС встречаются сильнопокатые и крутые тальвеги. В среднем по бассейну склоны варьируют от слабопологих до слабопокатых в ОАС, в ОФС и ОТС – от пологих до покатых, местами крутые и очень крутые (бассейн рек Баргузин и Утулик).

Результаты обработки материалов SRTM в сравнении со статической моделью показали, что водно-эрозионные элементы 1-го порядка являются эпизодическими, с длиной тальвегов от 120 м до 1,5 км. Элементы 2-го порядка – временными (средняя длина тальвега 1,5 км). Эпизодические и временные водотоки осуществляют склоновый сток, который впоследствии формирует русловой. И только начиная с 3-го порядка элементы представляют собой постоянные водотоки (с длиной водотока 1,5–10 км). Магнитуда в ОФС составляет 76 тыс. элементарных (эпизодических) водотоков. Наибольшая насыщенность элементами 1-го порядка наблюдается у речных систем Селенги, тектонических котловин и хр. Хамар-Дабан. Большое количество элементов первых порядков соответствует условиям развития водно-эрозионной сети горной территории и характеризует условия формирования стока как благоприятные. В ОТС мощность в среднем уменьшается в 1,5 раза, за исключением речных систем хр. Улан-Бургасы, здесь отмечается незначительный рост магнитуды. В области АС в очередной раз происходит снижение мощности по сравнению с ОФС практически в 10 раз. Изрезанность поверхности и наличие тальвегов с эпизодическим стоком в ОАС (10 тыс. элементов) способствуют формированию поверхностного стока. Коэффициент водно-эрозионного расчленения ($K_{эр}$) и густота речной сети (D) используются в качестве индикатора условий дренирования территории. Существенное различие этих двух показателей определяет аккумулирующую способность ОАС, а также потенциальную возможность последующей водоотдачи при определенных гидролого-климатических условиях (табл. 4).

Постоянные водотоки ОФС и ОТС речных систем *Приморского хребта* начинаются со 2-го порядка. Речная сеть ОАС несколько отличается между РС в зависимости от расположения относительно Приморского хребта. Реки Бугульдейка и Анга прорезают хребет на границе ОТС и ОАС, из-за расчлененности долин транзитными реками к постоянным водотокам здесь можно отнести только главное русло. При этом для речной системы Анги характерны наибольшая высота водосбора ОФС и ОТС, а также высота тальвегов ОТС. Реки Голоустная и Сарма прорезают хребет непосредственно в устьевой области, большая часть речной сети ОАС дренирует западный склон Приморского хребта, к постоянным водотокам относится как главное русло,

так и устойчиво существующие водотоки ближайшего младшего порядка. Речная система Сармы характеризуется максимальными уклонами поверхности водосбора, высотой тальвегов ОФС и ОАС, уклоном тальвегов ОТС и высотой водосбора ОАС, а РС Голоустной – уклоном тальвегов ОФС и ОАС и высотой водосбора ОТС (рис. 3, а).

Таблица 4

Коэффициент эрозионного расчленения рельефа и густота речной сети по областям стока

Речные системы	ОФС		ОТС		ОАС	
	$K_{эр}$, км/км ²	D , км/км ²	$K_{эр}$, км/км ²	D , км/км ²	$K_{эр}$, км/км ²	D , км/км ²
Приморского хребта	0,67	0,31	0,66	0,34	0,74	0,23
Байкальского хребта	0,65	0,2	0,71	0,26	0,81	0,26
Тектонических котловин	0,67	0,14	0,81	0,17	1,04	0,22
Баргузинского хребта (западные склоны)	0,73	0,14	0,73	0,24	0,97	0,63
Хребта Улан-Бургасы (северо-западные склоны)	0,66	0,31	0,77	0,33	0,77	0,17
Хребта Хамар-Дабан (северо-западные склоны)	0,65	0,29	0,84	0,57	0,89	0,37
Олхинского плато	0,67	0,27	0,64	0,32	1,08	0,54
Селенга	0,67	0,19	0,76	0,19	0,81	0,18

Речная сеть ОАС *Байкальского хребта* представлена нижним течением главной реки. В данной области максимальными уклонами и высотами водосбора и тальвегов отличается р. Холодная, так как речные системы этой области неоднократно прорезают горные хребты. Также для РС Холодной характерны максимальные уклоны и высоты водосбора ОФС и уклоны тальвегов ОТС. Постоянная сеть водотоков ОФС и ОТС РС Холодной и Тыи начинается с 3-го порядка, Рель – со 2-го, РС Тыи характеризуется наибольшими уклонами и высотами тальвегов ОФС, а Рель – уклонами и высотами водосбора, и высотой тальвегов ОТС (см. рис. 3, з).

Речные системы *тектонических котловин*. ОАС речной системы Верхней Ангары характеризуется наибольшими высотами и уклонами как поверхности водосбора, так и тальвегов. Данная область относится к Верхне-Ангарской межгорной впадине, ограниченной Верхнеангарским, Северо-Муйским и в нижнем течении Баргузинским хребтами. Склоны долины крутые, сильно расчленены многочисленными падами и распадками, что способствует формированию местного стока, постоянная речная сеть начинается с 3-го порядка. Так же, как и в ОАС, постоянные водотоки ОФС и ОТС начинаются с 3-го порядка, склоны сильно расчленены глубокими распадками и долинами притоков. Постоянная сеть водотоков РС Баргузина ОФС и ОТС начинается с 3-го порядка, эта зона характеризуется наибольшими высотами и уклонами водосбора, высотами и уклонами тальвегов ОФС и ОТС. Склоны крутые, сильно изрезаны глубокими ущельями и падами. ОАС речной системы Баргузина расположена в пределах обширной Баргузинской котловины, с крутыми и умеренно крутыми склонами, поверхность ее сильно заболочена, изобилует протоками и староречьями. И только непосредственно в устьевой области борта долины выполаживаются. Постоянная речная сеть здесь представлена водотоками 5-го порядка (см. рис. 3, з).

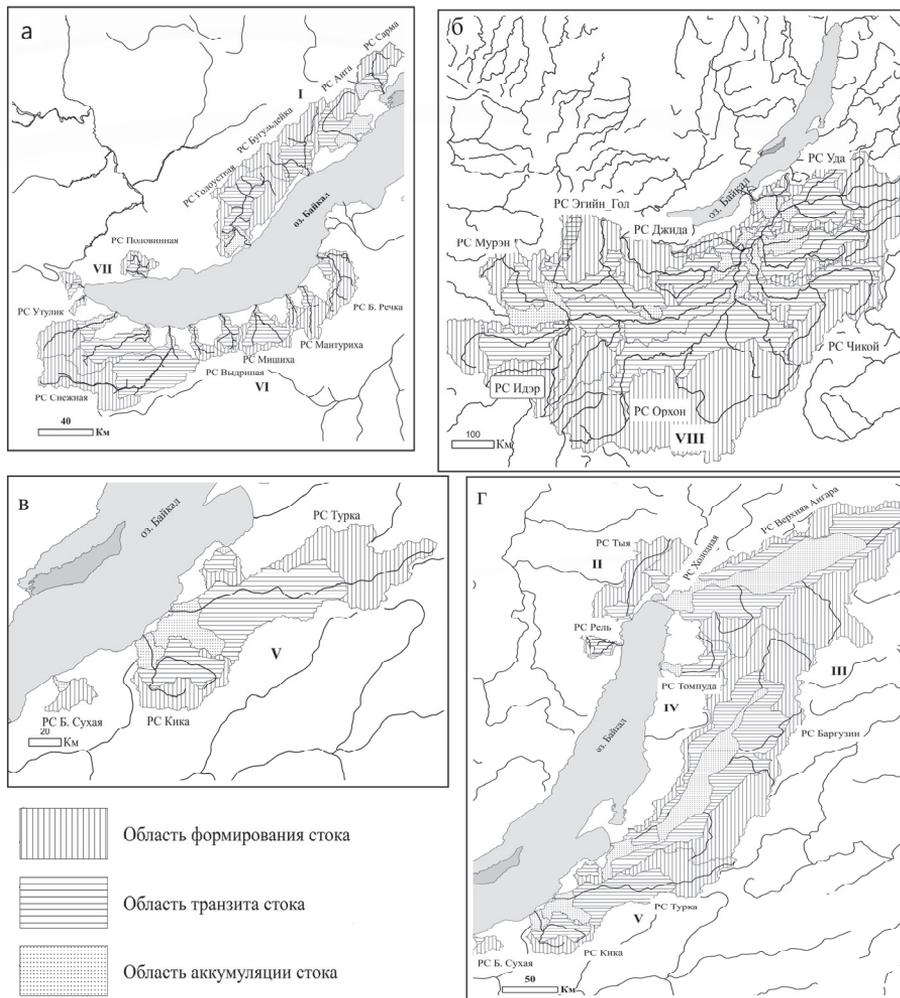


Рис. 3. Пространственное распределение областей стока в бассейне оз. Байкал: I – РС Приморского хребта, II – РС Байкальского хребта, III – РС межгорных котловин, IV – РС западного склона Баргузинского хребта, V – РС хребта Улан-Бургасы, VI – РС хребта Хамар-Дабан, VII – РС Олхинского плато, VIII – РС бассейна Селенги

Менее всего изучены реки западного склона *Баргузинского хребта*, самого высокого в пределах российской части бассейна Байкала, его западные склоны в виде отрогов постепенно снижаются к побережью озера. Здесь характерны троговые долины с многочисленными каскадами водопадов, а на платообразных частях хребта и у истоков рек нередко встречаются ледниковые озера. По высоте поверхности водосбора и уклону тальвегов территория занимает 2-е место после РС тектонических котловин в границах РФ. Во всех областях стока этой зоны постоянная речная сеть начинается с 3-го порядка (см. рис. 3, г).

Речные системы *хр. Улан-Бургасы*. Постоянная речная сеть ОФС и ОТС начинается со 2-го порядка. Наибольшие высоты и уклоны поверхности водосбора и тальвегов характерны для РС Турки, на всем протяжении река течет по сильно пересеченной горной местности, склоны долины крутые, сильно расчленены. От нижней границы ОФС в меженный период речная сеть представлена только главным руслом, с ничтожным формированием местного стока (см. рис. 3, *в*). В ОАС речной системы Турки расположено оз. Котокельское. Котловина его ограничена невысокими сопками, прорезанными многочисленными оврагами, паадьми, распадками. В Котокель впадают несколько ручьев и ряд ключей, вытекает только р. Исток, которая через систему рек Коточик – Турка имеет связь с Байкалом. В период максимального увлажнения из озера возникает местный сток, что приводит к увеличению порядка системы рек Исток – Коточик до 5. В ОАС р. Кика также имеется группа озер, наиболее крупное – Духовое, в период повышенной водности из которого в р. Кика поступает дополнительный объем стока в виде водотока 3-го порядка.

ОФС речных систем *хр. Хамар-Дабан* представлена постоянной речной сетью, начиная со 2-го порядка. Наибольшие высоты и уклоны поверхности водосбора и тальвегов наблюдаются в РС Переемной и Снежной. В нижней части ОФС речной системы Большой Речки от границы ОТС по правому берегу имеется локальная ОАС, где река протекает по заболоченной местности. В период повышенного стока эта область даст дополнительный объем в виде притока 4-го порядка. В меженный период ОТС и ОАС представлены только главной рекой (рис. 3, *а*). В ОТС входят постоянные водотоки со 2-го порядка, а те РС, долины которых зажаты хребтами (Утулик, Слюдянка и др.), представлены только главной рекой. Максимальные высоты и уклоны характерны для РС Хара-Мурин. Постоянная сеть водотоков ОАС выражена только главной рекой в меженный период с незначительным формированием местного стока в период максимального увлажнения. На некоторых реках данной зоны может отсутствовать ОАС, например, на р. Слюдянке, это происходит за счет подруслового стока. Для речных систем *хр. Хамар-Дабан* свойственно отсутствие области аккумуляции, для устьевых областей характерно наличие пролювиально-делювиальных конусов выноса различных размеров [Ильичева, Павлов, 2022]. Объяснить это можно несколькими причинами. Во-первых, малые размеры водосборного бассейна, небольшая протяженность речной сети, большое количество осадков, значительные уклоны как поверхности бассейна, так и тальвегов. Причем увеличение уклонов происходит с уменьшением площади водосбора. Во-вторых, рассматриваемая территория характеризуется как наиболее селеопасный район южного Прибайкалья [Гидрология юга ... , 1966; Макаров, 2012]. Здесь наблюдается ливневой характер осадков, интенсивное формирование продуктов разрушения горных пород, а также сейсмотектонические проявления.

В областях формирования и транзита стока речной системы Большой Половинной (*Олхинского плато*) постоянные водотоки начинаются со 2-го порядка, а ОАС представлена низовьями главной реки (см. рис. 3, *а*).

Площадь бассейна *Селенги* составляет более 50 % всего бассейна Байкала. Речная система *Селенги* имеет наивысший порядок (9) и представлена несколькими крупными речными системами. *Селенга* является наиболее протяженной и многоводной, формирует сток в различных географических зонах, а в период экстремальной водности – в аридной зоне (см. рис. 3, б). Как правило, определение границ речного бассейна проводится с учетом расположения водораздельных линий фактически действующих рек и озер, а также водотоков с эпизодическим стоком. При построении цифровой модели рельефа проводятся геоморфологические границы согласно непрерывности тальвегов на поверхности независимо от наличия современной речной сети. Таким образом, полученный геоморфологический бассейн [Гарцман, Галанин, 2011] в отдельных случаях не является водосборным. Морфогенез геоморфологического бассейна обусловлен действием текучих поверхностных вод. По всей видимости, это границы бассейна Пра-Селенги, соответствующие предшествовавшей палеогеографической эпохе с более влажным климатом. ЦМР отражает визуальное отличие между современной речной сетью, формирующей флювиальный рельеф, и древней русловой сетью бессточной области, рельеф которой значительно преобразован эоловыми процессами. Морфометрический анализ допускает существование на этой территории водно-эрозионных элементов речной системы Пра-Селенги, включая ее крупные притоки (р. Орхон) и функционирующие исключительно в период выпадения катастрофических осадков (экстремальная водность).

Речная система Идэр: постоянные реки в ОФС с 3-го порядка и имеют наибольшие уклоны поверхности водосбора. Область представлена множеством водотоков как временных, так и постоянных со слепыми устьями. В истоках расположено оз. Тэлмэн-Нур на высоте 1789 м, характеризуется как локальное понижение рельефа и служит своеобразной емкостью аккумуляции стока в меженный период и является бессточным. В период максимального увлажнения озеро является проточным за счет эпизодических и временных тальвегов, а также за счет водотоков со слепыми устьями, что дает предпосылки для формирования достаточно крупного притока, непосредственно впадающего в р. Идэр. Речная сеть ОТС начинается с 3-го порядка и характеризуется наибольшими уклонами и высотами поверхности водосбора и тальвегов всего бассейна оз. Байкал. ОАС в меженный период представлена только главной рекой, в период переувлажнения формируется местный сток.

Речная система Мурэн: ОФС и ОТС начинается с 3-го порядка. Для ОАС характерны наибольшие высоты как поверхности водосбора, так и тальвегов, что является благоприятным условием для формирования местного стока. Речная сеть по динамической модели начинается с 4-го порядка. Большой местный объем стока формируется за счет правого притока – р. Бугсейн-Гол, в истоках которого находится достаточно крупный источник аккумуляции стока – проточное озеро Сангийн-Далай-Нур.

Особенные условия формирования стока в речной системе р. *Орхон*, самой протяженной реки в пределах Монголии, она на 100 км длиннее р. *Селенги*, и именно при слиянии с р. *Орхон* РС *Селенги* достигает 9-го по-

рядка. Условия стокоформирования левобережной и правобережной частей бассейна различны. ОФС характеризуется наибольшей высотой тальвегов и поверхности бассейна и наибольшим уклоном тальвегов в бассейне оз. Байкал. Левобережная часть бассейна характеризуется чередованием невысоких хребтов и межгорных котловин, и только истоки находятся на хр. Хантай (3539 м), что благоприятствует аккумуляции влаги и формированию значительного стока в период максимального увлажнения. По динамической модели характерно большое количество эпизодических и временных водотоков вплоть до 4–5 порядка, как правило, имеющих слепые устья. ОТС левобережной части имеет аналогичные условия. Рельеф правобережной части бассейна р. Орхон горный с крутыми склонами, с благоприятными условиями формирования стока. Постоянные водотоки здесь начинаются с 3-го порядка. ОТС правобережной части имеет схожие условия. Для левобережной части бассейна ОАС характерно наличие только тальвегов с эпизодическим стоком. Для правобережной – постоянным водотоком является только один приток – Бурын-Гол. Однако за счет большой амплитуды высот поверхности бассейна и тальвегов здесь формируются значительные объемы местного стока в период максимального увлажнения.

Отличительной особенностью формирования стока р. *Эгийн-Гол* является то, что в ОФС не входит основное русло и имеется мощный источник аккумуляции – оз. Хубсугул. Основное русло расположено в ОТС. Так как область характеризуется наибольшими уклонами тальвегов в бассейне оз. Байкал, а также за счет регулирующей функции оз. Хубсугул в период максимального увлажнения формируется мощный сток и уже в истоке р. Эгийн-Гол имеет высокий 6-й порядок. В остальной части бассейна речная сеть начинается с 3-го порядка. В ОАС отмечены наибольшие уклоны тальвегов и поверхности водосбора, что является благоприятным условием для формирования местного стока.

Постоянные водотоки в ОФС и ОТС *речной системы Джиды* начинаются с 3-го порядка. ОАС заполнена аллювиальными отложениями и является областью потерь стока [Ресурсы поверхностных вод ... , 1973], на топографических картах представлена только главной рекой с системой эпизодических и временных водотоков со слепыми устьями, сток осуществляется подрусловым потоком. В период максимального увлажнения здесь формируются значительные объемы местного стока.

Верхняя часть ОФС и ОТС *речной системы Чикой* охватывает территорию, входящую в систему Хэнтэй-Чикойского нагорья с наиболее густой речной сетью, постоянные водотоки здесь начинаются со 2-го порядка. Для ОАС по статической модели характерно наличие главного русла реки с системой водотоков со слепыми устьями, по динамической же модели в период повышенной водности сформируется сеть притоков до 4-го порядка.

Бассейны *рек Хилок и Уда* характеризуются преимущественно среднегорным рельефом. Максимальная высота водосбора ОФС не превышает 2000 м, тальвегов – 1700 м, речная сеть постоянных водотоков ОФС и ОТС начинается с 3-го порядка. Почвенно-геологические условия ОАС способствуют потерям стока, постоянные водотоки начинаются с 4-го порядка, большинство имеет слепые устья.

Речная система Темник ОФС расположена в узкой продольной котловине, разделяющей Малый и Большой Хамар-Дабан, начинается с 3-го порядка. В нижнем течении (ОАС) р. Темник протекает по Гусиноозерской котловине, где разделяется на множество рукавов, а оз. Гусиное служит мощным регулятором стока, из которого в период повышенного стока формируется водоток 5-го порядка.

В пределах исследуемой территории отмечаются значительные карстовые проявления на юго-западном побережье оз. Байкал. В бассейнах речных систем Приморского хребта – в виде воронок, пещер, суходолов и карстовых озер. В бассейнах рек Голоустной, Бугульдейки и Анги некоторые притоки поглощаются карстовыми областями и выходят на поверхность в виде источников, и транзит осуществляется подрусловым стоком.

Своеобразно проявляется карст в бассейнах рек южной оконечности оз. Байкал. Подземные формы представлены понорами, щелями и карманами, наиболее крупные поверхностные формы (суходолы) развиты в правобережной части бассейна р. Слюдянки. Экспериментально выявлен перехват стока р. Похабихой из русла р. Слюдянки по тектоническим трещинам, размеры которых увеличены карстом [Гидрогеология СССР, 1968; Инженерная геология ... , 1968]. Небольшие закарстованные участки встречаются в верхней части бассейна р. Джиды и в левобережной части р. Темника. Карст здесь представлен небольшими воронками, пещерами, карстовыми котловинами. Также отмечено, что карстовая пещера поглощает правосторонние притоки р. Кики, что также указывает на возможное отсутствие поверхностных участков транзита стока.

Индикатором характера гидрологических процессов является структура речных систем, выраженная суммарной энтропией [Гарцман, 2008]. Энтропия вычисляется для каждой внутренней вершины графа – ордерова по количеству вершин истоков (элементов 1-го порядка) для всех сливающихся водотоков каждой области стока. Суммарная энтропия для ОТС в 1,5 раза больше, чем для ОФС, для ОАС она возрастает еще примерно в 1,5 раза (табл. 5).

Таблица 5

Структурно-гидрологические характеристики ОФС, ОТС и ОАС

	ОФС	ОТС	ОАС
Суммарная энтропия, бит	до 45 000	45 000–75 000	более 75 000

Причиной этого является уменьшение количества звеньев элементарных порядков. При переходе от ОФС к ОТС (от горной территории к предгорной) к звеньям 1-го порядка начинают относиться элементы такой категории, которая соответствовала 2-му порядку ОФС. При переходе к ОАС происходит еще одна стадия уменьшения количества притоков низких порядков. При сравнительном анализе статической и динамической моделей выявлено, что процесс уменьшения количества притоков в ОАС происходит не столько за счет отсутствия элементарных звеньев дренажной сети, сколько за счет смены форм их организации, при этом происходит и уменьшение их длин. В

ОАС не образуются крупные водотоки также за счет расчлененности долинами крупных рек, о чем свидетельствует коэффициент эрозионного расчленения рельефа (см. табл. 4).

По полученным результатам исследования была создана картосхема пространственно-типологического распределения речных систем бассейна оз. Байкал по областям стока (рис. 4).

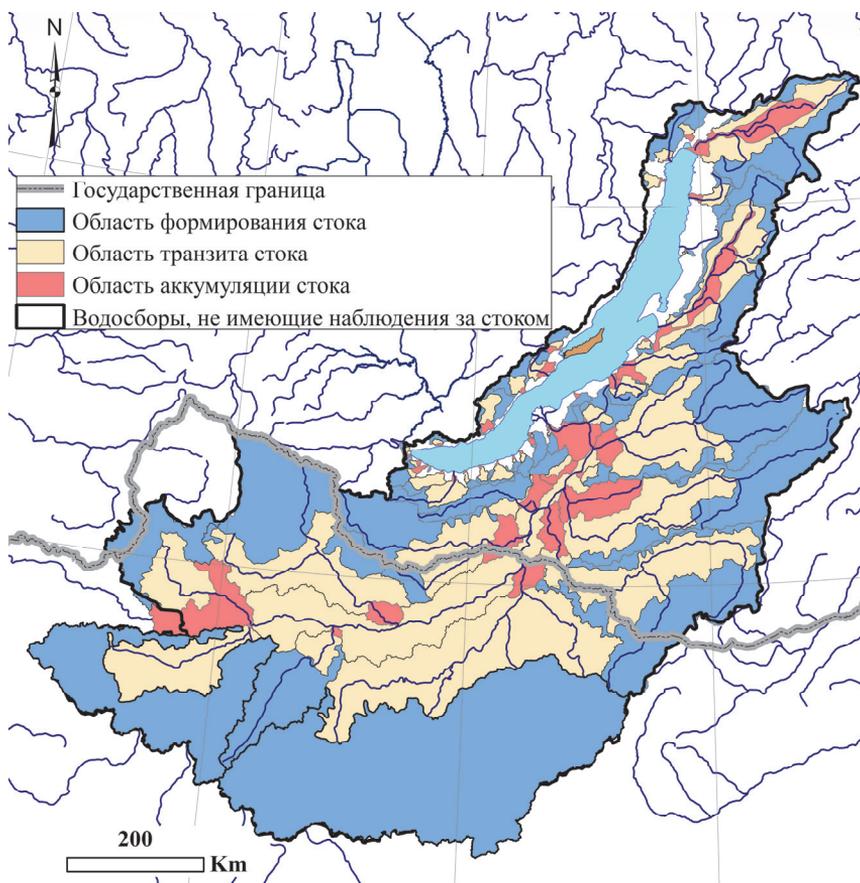


Рис. 4. Пространственно-типологическое распределение речных систем бассейна оз. Байкал по областям стока

Выводы

В условиях недостатка данных по стоку и неравномерности размещения наблюдательной сети в бассейне оз. Байкал структурно-гидрографический метод становится существенным источником информации для проведения оценки условий формирования поверхностного стока.

Бассейн Байкала имеет хорошо развитую речную сеть. Количество байкальских устьев составляет 959, из них постоянных водотоков – 230, временных (элементы 2-го порядка) – 175 и эпизодических – 554. Сток многих во-

дотоков осуществляется в осадочной толще устьевых областей и достигает Байкала подрусловым путем, что обуславливает отсутствие поверхностной области аккумуляции, и приводит к недоучету притока речных вод.

На основе физико-географического районирования бассейна оз. Байкал выделены провинции и межгорные зоны, которые дренируются речными системами, характеризующимися специфическими характеристиками стокоформирования.

Выделение областей формирования, транзита и аккумуляции стока проведено на основе структурно-гидрографического подхода строения речных систем. По полученным результатам исследования была создана картосхема пространственно-типологического распределения речных систем бассейна оз. Байкал по областям стока. Наибольший вклад в область формирования стока оз. Байкал принадлежит речным системам Селенги, Баргузина и Верхней Ангары с наибольшей насыщенностью элементарными водотоками. Наименьший вклад характерен речным системам западного склона Баргузинского хребта и Олхинского плато. К основным зонам повышенного стокоформирования относятся РС хребтов Хамар-Дабан и Улан-Бургасы. Область аккумуляции стока относительно всего бассейна оз. Байкал незначительна, в единичных случаях отсутствует.

Оценка насыщенности однофункциональными потоками речной системы показала, что условия формирования стока характеризуются как благоприятные. От области формирования стока к области транзита магнитуда в среднем уменьшается в 1,5 раза. В области аккумуляции стока происходит еще один этап снижения мощности по сравнению с областью формирования практически в 10 раз. Несмотря на это, изрезанность поверхности и наличие тальвегов с эпизодическим стоком в области аккумуляции стока способствуют формированию здесь поверхностного стока. Суммарная энтропия, расчеты которой основаны на мощности речной системы, также показала значимость в качестве индикатора гидрологических процессов. От области формирования стока к области аккумуляции суммарная энтропия увеличивается в 1,5 раза за счет смены форм дренажной сети и уменьшения ее протяженности. Малые постоянные водотоки сменяются овражно-балочной сетью, в ряде случаев более крупные теряются в заболоченных понижениях с неявно выраженными тальвегами.

Результаты исследования закономерностей строения водно-эрозионной сети с выделением областей формирования, транзита и аккумуляции стока актуальны для определения максимальной водоносности в условиях разреженной гидрометеорологической сети или ее отсутствия.

Список литературы

Амосова И. Ю., Ильчева Е. А. Пространственное распределение структурно-гидрографических характеристик речных систем бассейна озера Байкал // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2020. Т. 34. С. 21–36. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.34.21>

Антипов А. Н., Федоров В. Н. Ландшафтно-гидрологическая организация территории. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2000. 254 с.

- Гармаев Е. Ж.* Водные ресурсы рек бассейна озера Байкал: основы их использования и охраны. Новосибирск : Гео, 2010. 231 с.
- Гарцман Б. И.* Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска. Владивосток : Дальнаука, 2008. 223 с.
- Гарцман Б. И., Галанин А. А.* Структурно-гидрографический и морфометрический анализ речных систем: теоретические аспекты // География и природные ресурсы. 2011. № 3. С. 27–37.
- Гарцман И. Н., Казанский Б. А., Корытный Л. М.* Структурная мера речных систем и ее индикативные свойства (на примере систем Южно-Минусинской котловины) // Доклады Института географии Сибири и Дальнего Востока. 1976. Вып. 49. С. 54–60.
- Гвоздецкий Н. А., Михайлов Н. И.* Физическая география СССР. Азиатская часть. М. : Мысль, 1978. 512 с.
- Гидрогеология СССР. Т. 19. Иркутская область / под ред. В. Г. Ткачук. М. : Недра, 1968. 495 с.
- Гидрология юга Восточной Сибири / под ред. Б. В. Зонова. М. : Наука, 1966. 171 с.
- Государственный доклад о состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2022 году. URL: <https://irkobl.ru/sites/ecology/Госдоклад%202022.pdf> (дата обращения: 29.02.2024).
- Заславский М. Н.* Эрозиоведение. М. : Высш. шк., 1983. 183 с.
- Зекцер И. С., Джамалов Р. Г., Месхетели А. В.* Подземный водообмен суши и моря. Л. : Гидрометеиздат, 1984. 207 с.
- Ильичева Е. А., Павлов М. В.* Природные факторы формирования устьев притоков Байкала // География и природные ресурсы. 2022. № 5. С. 8–91. <https://doi.org/10.15372/GIPR20220509>
- Инженерная геология Прибайкалья / отв. ред. Г. Б. Пальшин. М. : Наука, 1968. 186 с.
- Макаров С. А.* Сели Прибайкалья. Иркутск : Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2012. 111 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Л. : Гидрометеиздат, 1973. Т. 16, вып. 3. 400 с.
- Ржаницына Н. А.* Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. Л. : Гидрометеиздат, 1960. 238 с.
- Философов В. П.* Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1960. 68 с.
- A GIS-based approach in drainage morphometric analysis of Kanhar River Basin, India / P. K. Rai, K. Mohan, S. Mishra [et al.] // Applied Water Science. 2017. Vol. 7, N 1. P. 217–232. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0238-y>
- Fluvial morphometry of supraglacial river networks on the southwest Greenland Ice Sheet / K. Yang, L. C. Smith, V. W. Chu [et al.] // GIScience & Remote Sensing. 2016. Vol. 53, N 4. P. 459–482. <https://doi.org/10.1080/15481603.2016.1162345>
- Horton R. E.* Erosional Development of Streams and their Drainage Basins: Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology // Geol. Soc. Amer. Bull. 1945. N 56. P. 275–370.
- Martins A. K., Gadiga B. L.* Hydrological and morphometric analysis of Upper Yedzaram catchment of Mubi in Adamawa State, Nigeria using Geographic Information System (GIS) // World Environment. 2015. Vol. 5, N 2. P. 63–69. <https://doi.org/10.5923/j.env.20150502.03>
- Montgomery D. R., Foufoula-Georgiou E.* Channel network source representation using digital elevation models // Water Res. Res. 1993. Vol. 29, N 12. P. 3925–3934. <https://doi.org/10.1029/93WR02463>
- O'Callaghan J. F., Mark D. M.* The extraction of drainage networks from digital elevation data // Computer Vision, Graphics, and Image Processing. 1984. Vol. 28, N 3. P. 323–344. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0)
- Rodrigues-Iturbe I., Rinaldo A.* Fractal River Basin. Chance and self-organization. Cambridge : Cambridge Univer. Press, 1997. P. 547.
- Scheidegger A. E.* On the topology of river nets // Water Resources Research. 1964. Vol. 3, N 1. P. 3–6.
- Schreive R. L.* Infinite topologically random channel networks // Y. Geol. 1967. Vol. 75, N 2. P. 178–186.
- SRTM 90 m DEM Digital Elevation Database. URL: <https://srtm.csi.cgiar.org/> (date of access: 03.02.2012).

Strahler A. N. Hypsometric (area – altitude) analysis of erosional topography // Geol. Soc. Amer. Bull., 1952. Vol. 63. P. 1117–1142.

Tests of peak flow scaling in simulated self-similar river networks / M. Menabde, S. Veitzer, V. K. Gupta, M. Sivapalan // Advances in Water Resources. 2001. N 24. P. 991–999.

Tribhuvan P. R., Sonar M. A. Morphometric analysis of a Phulambri river drainage basin (Gp8 Watershed), Aurangabad District (Maharashtra) using Geographical Information System Tribhuvan // International Journ. of Advanced Remote Sensing and GIS. 2016. Vol. 5, N 6. P. 1813–1828. <https://doi.org/10.23953/cloud.ijarsg.62>

Vitala S. S., Govindaiah S., Gowda H. H. Morphometric analysis of sub-watersheds in the Pavagada area of Tumkur district, South India using remote sensing and GIS techniques // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2004. Vol. 32, N 4. P. 351–362. <https://doi.org/10.1007/BF03030860>

Waikar M. L., Nilawar A. P. Morphometric analysis of a drainage basin using geographical Information System: a case study // International Journ. of Multidisciplinary and Current Research. 2014. Vol. 2. P. 179–184.

Zende A. M., Nagarajan R., Atal K. R. Prioritization of sub-watersheds in semiarid region, Western Maharashtra, India using Geographical Information System // American Journ. of Engineering Research. 2012. Vol. 02, N 10. P. 128–135.

References

Amosova I.Yu., Il'icheva E.A. Prostranstvennoe raspredelenie strukturno-gidrograficheskikh kharakteristik rechnykh sistem basseina ozera Baikal [Spatial distribution of structural and hydrographic characteristics of river systems in the Lake Baikal basin]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle* [The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences], 2020, no. 34, pp. 21–36. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.34.21> (in Russian)

Antipov A.N., Fedorov V.N. *Landshaftno-gidrologicheskaya organizatsiya territorii* [Landscape and hydrological organization of the territory]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2000, 254 p. (in Russian)

Garmaev E.Zh. *Vodnye resursy rek basseina ozera Baikal: osnovy ikh ispol'zovaniya i okhrany* [Water resources of the rivers of the Lake Baikal basin: the basics of their use and protection]. Novosibirsk, Geo Publ., 2010, 231 p. (in Russian)

Garcman B.I. *Dozhdevye navodneniya na rekah juga Dal'nego Vostoka: metody raschetov, prognozov, ocenok riska* [Rain floods on rivers of the south of the Far East: methods of calculations, forecasts, risk assessments]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2008, 223 p. (in Russian)

Garcman B.I., Galanin A.A. Strukturno-gidrograficheskij i morfometricheskij analiz rechnykh sistem: teoreticheskie aspekty [Structural-hydrographic and morphometric analysis of river systems: theoretical aspects]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and natural resources], 2011, no. 3, pp. 27–37. (in Russian)

Garcman I.N., Kazanskij B.A., Korytnyj L.M. Strukturnaja mera rechnykh sistem i ee indikativnye svoystva (na primere sistem Juzhno-Minusinskoj kotloviny) [Structural measure of river systems and its indicative properties (on the example of the systems of the Yuzhno-Minusinsk depression)]. *Trudy Dalnevostochnogo regionalnogo nauchno-issledovatel'skogo gidrometeorologicheskogo instituta* [Proceedings of the Far Eastern Regional Scientific Research Hydrometeorological Institute]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1976, no. 49, pp. 54–60. (in Russian)

Gvozdeckij N.A., Mihajlov N.I. *Fizicheskaja geografija SSSR. Aziatskaja chast* [Physical geography of the USSR. Asian part]. Moscow, Mysl Publ., 1978, 512 p. (in Russian)

Gidrogeologiya SSSR. T. 19. Irkutskaya oblast [Hydrogeology of the USSR. Vol. 19. Irkutsk region]. Moscow, Nedra Publ., 1968, 495 p. (in Russian)

Gidrologiya yuga Vostochnoi Sibiri [Hydrology of the South of Eastern Siberia]. Moscow, Nauka Publ., 1966, 171 p. (in Russian)

Gosudarstvennyj doklad o sostojanii ozera Bajkal i merah po ego ohrane v 2022 godu [State report on the state of Lake Baikal and measures for its protection in 2022]. 2023. Available at: <https://irkobl.ru/sites/ecology/Госдоклад%202022.pdf> (data of access: 29.02.2024). (in Russian)

Zaslavskii M.N. *Eroziovedenie* [Erosion studies.]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983, p. 183. (in Russian)

- Zektser I.S., Dzhamalov R.G., Meskheteli A.V. *Podzemnyi vodoobmen sushi i moray* [Underground water exchange of land and sea]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1984, 207 p. (in Russian)
- Il'icheva E.A., Pavlov M.V. Prirodnye faktory formirovaniya ust'ev pritokov Baikala [Natural factors in the formation of the mouths of the Baikal tributaries]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and natural resources], 2022, no. 5, pp. 83-91. <https://doi.org/10.15372/GIPR20220509>. (in Russian)
- Inzhenernaya geologiya Pribaikalya* [Engineering geology in the Cisbaikalia]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 186 p. (in Russian)
- Makarov S. A. *Seli Pribaikalya* [Debris flows in the Cisbaikalia]. Irkutsk, Institut geografii SB RAS Publ., 2012, 111 p. (in Russian)
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR* [Resources of surface waters of the USSR]. Vol. 16, Issue 3. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1973, 400 p. (in Russian)
- Rzhanitsyn N.A. *Morfologicheskie i gidrologicheskie zakonomernosti stroeniya rechnoi seti* [Morphological and hydrological patterns of the structure of the river network]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1960, 238 p. (in Russian)
- Filosofov V.P. *Osnovy morfometricheskogo metoda poiskov tektonicheskikh struktur* [Fundamentals of the morphometric method of searching for tectonic structures]. Saratov, Saratov University Publ., 1960, 68 p. (in Russian)
- Rai P.K., Mohan K., Mishra S. et al. A GIS-based approach in drainage morphometric analysis of Kanhar River Basin, India. *Applied Water Science*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 217-232. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0238-y>
- Yang K., Smith L.C., Chu V.W. et al. Fluvial morphometry of supraglacial river networks on the southwest Greenland Ice Sheet. *GIScience & Remote Sensing*, 2016, vol. 53, no. 4, pp. 459-482. <https://doi.org/10.1080/15481603.2016.1162345>
- Horton R.E. Erosional Development of Streams and their Drainage Basins: Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1945, no. 56, pp. 275-370.
- Martins A.K., Gadiga B.L. Hydrological and morphometric analysis of Upper Yedzaram catchment of Mubi in Adamawa State, Nigeria using Geographic Information System (GIS). *World Environment*, 2015, vol. 5, no. 2, pp. 63-69. <https://doi.org/10.5923/j.env.20150502.03>
- Montgomery D.R., Foufoula-Georgiou E. Channel network source representation using digital elevation models. *Water Res. Res.*, 1993, vol. 29, no. 12, pp. 3925-3934. <https://doi.org/10.1029/93WR02463>
- O'Callaghan J.F., Mark D.M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1984, vol. 28, no. 3, pp. 323-344 [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0)
- Rodrigues-Iturbe I., Rinaldo A. *Fractal River Basin. Chance and self-organization*. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1997, 547 p.
- Scheidegger A.E. On the topology of river nets. *Water Resources Research*, 1964, vol. 3, no. 1, pp. 3-6.
- Schreve R. L. Infinite topologically random channel networks. *Y. Geol.*, 1967, vol. 75, no. 2, pp. 178-186.
- SRTM 90 m DEM Digital Elevation Database*. Available at: <https://srtm.csi.cgiar.org/> (date of access: 03.02. 2012).
- Strahler A.N. Hypsometric (area – altitude) analysis of erosional topography. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1952, vol. 63, pp. 1117-1142.
- Menabde M., Veitzer S., Gupta V.K., Sivapalan M. Tests of peak flow scaling in simulated self-similar river networks. *Advances in Water Resources*, 2001, no. 24, pp. 991-999.
- Tribhuvan P.R., Sonar M.A. Morphometric analysis of a Phulambri river drainage basin (Gp8 Watershed), Aurangabad District (Maharashtra) using Geographical Information System Tribhuvan. *International Journ. of Advanced Remote Sensing and GIS*, 2016, vol. 5, no. 6, pp. 1813-1828. <https://doi.org/10.23953/cloud.ijarsg.62>
- Vittala S.S., Govindaiah S., Gowda H.H. Morphometric analysis of sub-watersheds in the Pavagada area of Tumkur district, South India using remote sensing and GIS techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2004, vol. 32, no. 4, pp. 351-362. <https://doi.org/10.1007/BF03030860>

Waikar M.L., Nilawar A.P. Morphometric analysis of a drainage basin using geographical Information System: a case study. *International Journ. of Multidisciplinary and Current Research*, 2014, vol. 2, pp. 179-184.

Zende A.M., Nagarajan R., Atal K.R. Prioritization of sub-watersheds in semiarid region, Western Maharashtra, India using Geographical Information System. *American Journ. of Engineering Research*, 2012, vol. 02, no. 10, pp. 128-135.

Сведения об авторах

Амосова Ирина Юрьевна

младший научный сотрудник,
лаборатория гидрологии и климатологии
Институт географии им. В. Б. Сочавы
СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 1.
преподаватель, кафедра гидрологии
и природопользования
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: irinaamosova_83@mail.ru

Ильичева Елена Анатольевна

кандидат географических наук, старший
научный сотрудник, лаборатория
гидрологии и климатологии
Институт географии им. В. Б. Сочавы
СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 1
доцент кафедры гидрологии
и природопользования
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: lenail3663@mail.ru

Information about the authors

Amosova Irina Yuriyevna

Junior Researcher Scientist, Laboratory of
Hydrology and Climatology
V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS
1, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
Lecturer, Department of Hydrology and
Environmental Management
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: irinaamosova_83@mail.ru

Ilicheva Elena Anatolievna

Candidate of Sciences (Geography),
Senior Researcher, Laboratory
of Hydrology and Climatology
V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS
1, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
Associate Professor, Department of Hydrology
and Environmental Management
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: lenail3663@mail.ru

Код научной специальности **1.6.16**

Статья поступила в редакцию **15.01.2024**; одобрена после рецензирования **25.04.2024**; принята к публикации **07.06.2024**

The article was submitted **January, 15, 2024**; approved after reviewing **April, 25, 2024**; accepted for publication **June, 07, 2024**