



УДК 556.522(1-925.16)
DOI <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.34.21>

Пространственное распределение структурно-гидрографических характеристик речных систем бассейна озера Байкал

И. Ю. Амосова

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, Россия

Е. А. Ильичева

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

Аннотация. Проведен анализ структурно-гидрографических параметров речных систем и их взаимосвязей для дальнейшего использования в расчетах стока и условий его формирования для неизученных рек. Гидрологической основой являются среднесезонные и максимальные наблюдаемые расходы воды в 96 створах стандартной сети наблюдений. Исследование речных систем осуществлено по материалам топографических карт масштабов 1:500 000 и 1:200 000 и радарной топографической съемки, ставшим основой для построения статической и динамической моделей речных систем. Статическая модель состоит из совокупности постоянно действующих водотоков и отражает условия непрекращающегося стока. В период экстремальной водности заполняется система временных и эпизодических водотоков, при этом ранее неприточные звенья русловой сети становятся элементами более высокого порядка. Такая модель названа динамической. Исследование проведено для речных систем бассейна оз. Байкал на российской его части. Все параметры речных систем и их бассейнов разделены на простейший, структурный и экспозиционный классы, характеризующие условия формирования тальвегов, а впоследствии и стока. При комплексном рассмотрении рассчитанных параметров выделяется семь областей, объединяющих речные системы. Критерием распределения исследуемой территории на однородные участки для расчета водоносности был принят средний структурный модуль, который представляет собой отношение расхода воды к суммарной энтропии в этой точке.

Ключевые слова: водно-эрозионная сеть, оз. Байкал, речные системы, строение речной сети, структурно-гидрографические характеристики, структурный модуль.

Для цитирования: Амосова И. Ю., Ильичева 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>

Введение

Исследование строения речных систем (РС) всегда является актуальным для тех районов, где невозможно получить гидрологическую информацию путем непосредственных измерений, или районов с разреженной гид-

рологической сетью наблюдений и включает изучение комплекса параметров по речному бассейну и русловой сети. Анализ структурно-гидрографических характеристик речных систем и их взаимосвязей проведен с целью оценки пространственного распределения этих параметров и дальнейшего расчета стока, условий его формирования для неизученных рек.

Постоянно действующая речная сеть, представляемая на топографических картах, включает реки в условиях средней водоносности и имеет среднемноголетний устойчивый характер. С появлением общедоступных цифровых моделей рельефа возникает новый этап исследований взаимосвязей характеристик структурного класса водно-эрозионной сети и параметров речного бассейна как индикаторов максимальной водоносной способности речной системы.

Материалы и методы исследования

Все параметры речных систем и их бассейнов разделены на три класса: простейшие, структурные и экспозиционные. Каждый класс состоит из нескольких групп, а группы в свою очередь делятся на основные по бассейну и водно-эрозионной сети, дополнительно рассматриваются эти характеристики по порядкам [Корытный, 1984].

Простейший класс характеристик включает в себя морфометрические параметры бассейна, отражающие условия поступления воды и возможности для формирования тальвегов. Этот класс объединяет группы:

- 1) элементарных характеристик (площадь бассейна, суммарная длина водно-эрозионной сети);
- 2) высотных характеристик (средняя и максимальная высота водосбора, средний уклон водосбора и водной поверхности, глубина эрозионного вреза речного русла).

Характеристики структурного класса предусматривают исследование топологических закономерностей строения РС, отражающих индивидуальные особенности влагооборота и рельефа территории и условия формирования стока. К структурному классу относятся группы:

- 1) составных характеристик (графическая характеристика – граф речной сети, порядковый состав речной системы по схемам Хортон – Стрелера, Шрива и Шайдеггера, коэффициент бифуркации);
- 2) удельных характеристик (частота потока, гидроморфологический коэффициент (ГМК), коэффициент водно-эрозионного расчленения рельефа);
- 3) системно-структурных характеристик (суммарная энтропия и структурный модуль устойчивого среднего многолетнего и максимального наблюдаемого стока).

Группа ориентационных характеристик (экспозиционно-симметричный класс) определяет увлажненность территории относительно главного направления влагопереноса (выделение орографических зон увлажнения).

Дополнительными характеристиками каждой группы является распределение их по порядкам.

Исследование составных характеристик РС опирается на граф речной сети. Граф представляет собой схематизированное изображение РС, строящееся по топографическим картам, и является статической моделью. В периоды повышенной водности в процессе стокоформирования начинает работать и сеть временных, эпизодических водотоков, как правило, это водно-эрозионные элементы первого и второго порядков. Так, использование современных материалов ДЗЗ позволяет построить граф всей водно-эрозионной речной системы по совокупности тальвегов на поверхности бассейна и перейти к динамической модели. Динамическая модель РС рассматривается как идеальная, поскольку при интенсивном увлажнении водоемы (озера и болота) исследуемого бассейна можно считать проточными и использовать их в расчетах как линейные объекты водно-эрозионной сети.

Первоначально разбиение речной системы на порядки проводится по схеме Хортона – Стралера [Хортон, 1948; Strahler, 1952]. Речная система от истоков к устью состоит из отрезков, соответствующих порядку от точки слияния с тем же или более высоким порядком до следующего такого же узла, порядок в замыкающем створе характеризует всю систему.

Порядковая классификация Шрива отражает расчлененность рельефа водно-эрозионной сетью [Schreve, 1967]. Основным показателем служит мощность речной системы (магнитуда), т. е. общее количество элементов первого порядка. Здесь приток является единицей сложности системы. Максимальная мощность накапливается к устьевому участку и распространяется на всю систему, и чем больше данная система содержит таких элементов, тем выше будет уровень ее сложности. Однако в ряде случаев получаемые значения порядков рек оказываются очень большими, что приводит к техническим проблемам [Алексеевский, Айбулатов, Косицкий, 2004].

Порядковая классификация Шайдеггера [Scheidegger, 1964] определяет сложность РС как логарифм насыщенности элементарными водно-эрозионными элементами [Антипов, Коротный, 1981]. Этот подход к выявлению порядка устраняет сложности, возникающие при расчете порядка по Шриву. Поскольку в данном случае величина порядка не целое число, то получаемое его значение иногда называют условным порядком [Алексеевский, Ретеюм, Чуткина, 1998]. Геометрическая суммарная длина таких элементов обуславливает суммарные русловые запасы воды в системе, форму гидрографа и др. [Казанский, 1980].

Несмотря на различия в схемах определения порядка РС, они достаточно тесно согласованы, что позволяет в случае необходимости пересчитать порядок из одной системы в другую [Алексеевский, Айбулатов, Косицкий, 2004].

Концепция магнитуд также вовлекается в расчеты и других структурных параметров, в частности коэффициента бифуркации и частоты потока (удельная характеристика РС).

Не менее значимым параметром строения РС выступает коэффициент бифуркации, устанавливающий соотношения количества элементов речной сети смежных порядков. Высокие значения коэффициента свидетельствуют о хорошо развитой и относительно молодой водно-эрозионной сети.

Удельные характеристики речных систем, опираясь на составные параметры РС и простейшие характеристики, отражают закономерности условий формирования стока.

Частота потока представляет собой отношение количества рек, приходящихся на единицу площади [Хортон, 1948]. В настоящем исследовании для более удобного представления количество рек отнесено к площади в 100 км^2 . Данный параметр может быть сравним с густотой речной сети.

Детальное определение количественных и качественных параметров всех звеньев эрозионной сети дает представление об эрозионной расчлененности рельефа, впоследствии обуславливающей обстоятельства формирования руслового стока с речного бассейна. Такой характеристикой служит коэффициент водно-эрозионного расчленения, под которым понимается отношение суммарной протяженности водно-эрозионных форм к единице площади.

С другой стороны, оценить эрозионное расчленение территории по связи со средним уровнем ее водоносности возможно через гидроморфологический коэффициент (ГМК) [Орлов, 1981]. Чем больше значение этого коэффициента, тем интенсивнее данный бассейн подвержен расчленению и тем выше регулирующая способность этой речной системы. Однако ГМК не зависит от климата, а определяется геологическими особенностями подстилающей поверхности и позволяет индцировать условные стадии развития РС [Лобанова, 1977]. Этот коэффициент вычисляется отношением суммарной протяженности речной системы к среднему многолетнему расходу воды в замыкающем створе и соответствует протяженности речной сети, формирующей расход воды в $1 \text{ м}^3/\text{с}$. ГМК тесно связывают с глубиной эрозионного вреза, которая определяет эрозионный цикл развития рельефа [Аллисон, Палмер, 1984], для уточнения стадии развития РС. Глубина эрозионного вреза – это величина углубления речной и овражно-балочной сети в толщу земной коры в пределах рассматриваемых створов [Чеботарев, 1978].

Продолжением удельных и составных характеристик является группа системно-структурных (энтропийных) параметров. В отличие от рассмотренных выше параметров эта группа учитывает не просто количество элементов и их распределение, но и их взаимосвязь [Гарцман, 1973; Гарцман, Казанский, Корытный, 1976], что делает ее важным классификационным ресурсом в определении средней водоносности и водоносной способности речных систем. За основной расчетный параметр принят структурный модуль, который представляет собой отношение среднего многолетнего расхода воды к структурной мере (суммарной энтропии) в этой точке [Гарцман, 2008].

В периоды недостаточного увлажнения сток рек уменьшается, а иногда и полностью прекращается. А максимально возможный сток, который вмещает водно-эрозионная сеть в периоды интенсивного и экстремального увлажнения, и есть водоносная способность РС. Таким образом, водоносность представляется величиной как среднего многолетнего стока, так и максимального стока (динамическая модель).

Расчеты структурных характеристик и порядок РС (по Хортону – Стрелеру, Шриву и Шайдеггеру) проведены по программе «Энтропия» (автор Б. И. Гарцман).

За основу пространственного распределения максимальной водоносной способности РС была принята (и дополнена нами) локальная зависимость средней водоносности от суммарной энтропии РС бассейна оз. Байкал [Антипов, Абасов, Бережных, 2003].

Для определения максимальной водоносности необходимо последовательно выполнить следующие действия:

1) установить принадлежность речной системы к одной из групп речных бассейнов по условиям формирования стока (физико-географическим, геолого-геоморфологическим), используя локальную зависимость средней водоносности от суммарной энтропии. Максимальный структурный модуль рассчитывается как отношение максимального наблюдаемого расхода воды к суммарной энтропии средней водоносности;

2) используя граф речной системы, построенный для всей водно-эрозионной сети (по данным снимков SRTM), рассчитать суммарную энтропию для всех узлов слияния водотоков;

3) вычислить максимальную водоносную способность РС как произведение максимального структурного модуля и значения суммарной энтропии (по данным снимков SRTM) в створе;

4) зная суммарную энтропию во всех узлах слияния водотоков, методом пространственной интерполяции определить сток в любом интересующем месте.

Исследование проведено для РС бассейна оз. Байкал на российской его части. Различия в морфометрических и структурно-гидрографических характеристиках бассейна оз. Байкал на территории РФ и Монголии определяют их контрастность и мозаичность распределения, при этом монгольская часть бассейна выделяется в самостоятельную область и, в свою очередь, имеет весьма разреженную наблюдательную сеть, что требует дополнительного исследования этой территории.

Гидрологической основой являются среднесезонные и максимальные наблюдаемые расходы воды в створах стандартной сети наблюдений. Расчеты проведены по 96 створам, из них 52 находятся в бассейне р. Селенги. В качестве картографического материала использовались топографические карты масштабов 1:500 000 и 1:200 000 и данные радарной съемки (SRTM) (<http://srtm.csi.cgiar.org>).

Выполнен сравнительный анализ порядкового состава РС разномасштабных топографических карт и цифровой модели рельефа (ЦМР). Если рассматривать речную сеть по ЦМР по совокупности линий тока (талвегов) на поверхности бассейнов с учетом всей гидрографической сети, то порядок по классификации Шрива (магнитуда) во много раз превосходит магнитуду, определяемую с топографических карт масштаба 1:500 000, но будет близким к топографическим картам масштаба 1:200 000. Комплексное использование разномасштабных карт и ЦМР позволяет провести оценку количества

устьев, непосредственно впадающих в оз. Байкал, классифицировать их на постоянные реки, временные водотоки и пади и распадки с эпизодическим стоком [Амосова, Ильичева, 2017], что позволяет перейти к исследованию структуры от речной сети к водно-эрозионной.

Результаты и обсуждение

Различия морфометрических и структурно-гидрографических характеристик дают представление о порядке рассматриваемых величин в исследуемых бассейнах, что в конечном итоге определяет контрастность распределения стока и водоносной способности в РС.

На общем фоне рельефа поверхности бассейнов выделяются следующие области, объединяющие речные системы: РС Приморского хребта, Байкальского хребта, РС котловин байкальского типа, реки, дренирующие северо-западные склоны хребтов Хамар-Дабан и Улан-Бургасы, западные склоны хр. Баргузин, и отдельную область составляют РС бассейна р. Селенги.

Экспозиционно-симметричный класс. Ведущими факторами в пространственном распределении стока являются ориентационные характеристики. Сложное строение рельефа в бассейне Байкала формирует неоднородную картину распределения осадков, сумма которых изменяется в пределах 250–1400 мм в год [Афанасьев, 1976]. Основные горные поднятия простираются с юго-запада на северо-восток. Господствующий перенос воздушных масс во все сезоны года имеет северо-западное направление. Во многом формирование и объемы речного стока обусловлены экспозиционным положением водосбора: так, на наветренных северо-западных склонах выпадает большее количество осадков, чем на подветренных юго-восточных. Выделяются следующие орографические зоны увлажнения: первичные наветренные склоны (северо-западный склон хр. Хамар-Дабан); вторичные наветренные (западный склон Баргузинского хребта и северо-западный склон хр. Улан-Бургасы); первичные подветренные (юго-восточные склоны Байкальского и Приморского хребтов и хр. Хамар-Дабан той же ориентации); территория, расположенная восточнее хребтов Ключевского, Улан-Бургасы и Баргузинского, относится к типу защищенных хребтами районов, это бассейн р. Сленги, Баргузинская и Верхнеангарская котловины.

Простейший класс. Наименьшие площади водосбора имеют РС хр. Хамар-Дабан (от 12,3 до 3009 км²), близкие значения – у РС западного склона Баргузинского хребта (до 1822 км²). Следует отметить, что под влиянием гидрогеологических условий наблюдается несовпадение поверхностного и подземного водоразделов рек, приуроченных к северо-западному склону хр. Хамар-Дабан. В частности, р. Похабиха перехватывает до 35 % стока р. Слюдянки [Афанасьев, 1976]. Также сходны между собой по величине площади водосбора РС Байкальского (770–2284 км²) и Приморского хребтов (564–2613 км²). Наибольшие площади бассейна принадлежат РС котловин байкальского типа (реки Баргузин – 21 174 и Верхняя Ангара – 20 639 км²) и РС бассейна р. Селенги (до 44 972 км²). Наименьшие площади

элементарных водотоков первого порядка также имеют РС хр. Хамар-Дабан (1,97 км²), максимальные – РС западного склона хр. Улан-Бургасы (2,52 км²), а также РС котловин байкальского типа (2,44 км²) и бассейна р. Селенги (2,45 км²).

РС Селенги относится к классу крупнейших рек по классификации [Корытный, 1985] и по причине значительной площади водосбора и, как следствие, полизональности физико-географических условий стокоформирования рассматривается как отдельная область.

Распределение средних и максимальных высот суббассейнов подчиняется общим отметкам абсолютных высот систем хребтов. Наименьшие средние высоты приурочены к бассейнам РС хребтов Приморский и Улан-Бургасы (813 и 820 м соответственно). Среднее значение высот составляет 867 м и соответствует суббассейнам р. Селенги и РС котловин байкальского типа. Наибольшие средние высоты наблюдаются в бассейнах РС Байкальского (1084 м) и Баргузинского (1021 м) хребтов. Максимальные высоты соответствуют элементарным водотокам первого и второго порядков и составляют от 2800–2600 (РС Верхней Ангары и Баргузина и Баргузинского хребта) до 2500–2400 м (в речных бассейнах Байкальского хребта и хр. Хамар-Дабан). Несколько меньшие значения (до 2000 м) соответствуют суббассейнам Приморского хребта, хр. Улан-Бургасы и бассейну р. Селенги. Исключение – бассейн РС р. Чикой, максимальные высоты здесь достигают 2652 м.

Не менее важной характеристикой является уклон водосбора и водной поверхности. В силу того что бассейн оз. Байкал в целом является горной страной [Афанасьев, 1976], с высокими абсолютными отметками рельефа, то и уклоны водосборов и водной поверхности довольно высоки.

Самые низкие и в то же время самые высокие значения уклонов водосбора и водной поверхности принадлежат РС хр. Хамар-Дабан и варьируют в широких пределах (от 3–4 до 41–42° и от 1–2 до 19–20° соответственно). Следующую ступень занимают водосборы РС Байкальского хребта (от 15–16 до 25–26°), РС котловин байкальского типа (от 17–18° р. Баргузин до 19–20° р. Верхней Ангары). Уклоны водосборов Приморского и Баргузинского хребтов сходны (от 8–9 до 19–20°). Наименьшие уклоны водосбора у р. Селенги и в среднем составляют 8–9°, выделяется РС Джиды с уклоном в 16–17°.

Самые низкие уклоны водной поверхности в бассейне р. Селенги и в среднем составляют 3–4°. Уклоны водной поверхности РС хребтов Улан-Бургасы и Баргузинского находятся в диапазоне 3–6 и 3–8° соответственно. Достаточно высоки уклоны и на остальной территории исследования: РС Приморского хребта – 5–11°, Байкальского – 5–9°, РС Баргузина и Верхней Ангары – 6 и 7° соответственно. Реки юго-западного побережья оз. Байкал на всем протяжении, вплоть до самого устья, носят горный характер и отличаются бурным течением.

Суммарная длина водно-эрозионной сети – это совокупность длин постоянно действующих рек, временных водотоков с учетом оврагов, логов и балок, имеющих эпизодический сток, длиной от 75 м. Несомненно, максимальную длину водно-эрозионной сети (более 100 тыс. км) имеет РС Селен-

ги, она составляет 96 % от суммарной длины гидросети бассейна оз. Байкал. 2,5 % приходится на РС Верхней Ангары и Баргузина (суммарно 28 600 км) и 1,5 % составляют остальные РС в бассейне. Наиболее протяженные элементы первого порядка в РС Баргузинского хребта, Верхней Ангары и Байкальского хребта. Наименьшая протяженность у РС хребтов Хамар-Дабан и Улан-Бургасы.

Глубина эрозионного вреза рек в бассейне оз. Байкал повсеместно высокая и как подчиняется общей системе высот хребтов, так и имеет локальные зависимости от максимальных и средних высот водосборов, а также от тектонических поднятий и опусканий. Максимальные значения глубины вреза у РС хребтов Хамар-Дабан, Баргузинского и Байкальского для бассейнов с абсолютными максимальными и максимальными средними высотами суббассейнов, что составляет 200–250 м. Минимальная глубина вреза (до 100–125 м) соответствует РС хребтов Приморский и Улан-Бургасы, а также бассейну р. Селенги. Глубина эрозионного вреза находится в тесной обратной зависимости от гидроморфологического коэффициента.

Структурный класс. Речная сеть исследуемой территории представлена реками 2–7-го порядков (табл. 1). Самая значительная по мощности – система р. Селенги 9-го порядка, на территории РФ в нее входят четыре системы 7-го порядка (реки Уда, Хилок, Чикой, Джида), две системы 6-го порядка – реки Темник и Оронгой и две системы 5-го порядка – реки Итанца и Куйтунка. РС Приморского хребта и хр. Улан-Бургасы представлены реками 5-го и 6-го порядков, Байкальского хребта – 4–6-го порядков, Баргузинского – 4–5-го и хр. Хамар-Дабан – 2–5-го. РС Верхней Ангары (8-й порядок) и Баргузина (7-й порядок) имеют примерно равную магнитуду, что объясняется сходными условиями формирования русловой сети. Максимальной мощностью обладает РС Селенги (более 40 тыс. водно-эрозионных элементов), наименьшей – РС Баргузинского хребта. Примерно одинаковое соотношение мощности имеют РС хребтов Хамар-Дабан и Улан-Бургасы (2226 и 2167 соответственно) и Приморского и Байкальского хребтов (1585 и 1585 соответственно).

Порядок речных систем в динамической модели увеличивается на 1–2 разряда. Порядок не меняется в случаях сильного расчленения бассейна или множества фуркаций гидрографической сети при максимальном увлажнении [Амосова, Ильичева, 2017].

Логарифмическое преобразование мощности РС представляет порядок по Шайдеггеру, порядок изменяется по длине постепенно, при этом порядки отдельных водотоков не представляют самостоятельного интереса [Карасев, Худяков, 1984], для определения и оценки состава русловой сети целесообразно использовать РС в целом. Порядковая классификация по Шайдеггеру и ее соответствие с бонитировками Хортон – Стралера и Шрива представлена в табл. 1. Выбор классификации зависит в первую очередь от поставленных задач.

Для бассейна оз. Байкал значение коэффициента бифуркации находится в диапазоне 4,0–5,0 (см. табл. 1), а среднее его значение составляет 4,2, что говорит о сходном строении речных систем и позволяет использовать единые приемы индикации.

Таблица 1

Составные характеристики речных систем бассейна оз. Байкал

Речные системы	Характеристики	Порядковый состав			Коэффициент бифуркации
		по Хортону–Стралеру	по Шриву (магнитуда)	по Шайдеггеру	
Приморского хребта	min	5	216	8,755	3,67
	max	6	594	10,214	5,31
	среднее и/или сумма		1585**	9,536*	4,37*
Байкальского хребта	min	4	144	8,170	3,77
	max	6	629	10,297	5,22
	среднее и/или сумма		1038**	9,172*	4,46*
котловин байкальского типа	min	7	5499	13,425	4,21
	max	8	5169	13,336	3,58
	среднее и/или сумма		5334**	13,3805*	3,90*
хр. Хамар-Дабан	min	2	4	3,000	2,50
	max	5	735	10,522	5,50
	среднее и/или сумма		2226**	6,897*	4,12*
хр. Улан-Бургасы	min	5	84	7,392	3,38
	max	6	420	11,472	5,16
	среднее и/или сумма		2167**	9,221*	4,08*
Баргузинского хребта	min	4	26	5,700	3,11
	max	5	438	9,775	4,81
	среднее и/или сумма		2167**	7,738*	3,96*
бассейна р. Селенги	min	3	25	5,644	3,94
	max	7	11436	14,481	6,07
	среднее и/или сумма		3542**	10,712*	4,72*

Примечание: * – среднее значение характеристик речных систем, ** – сумма характеристик.

Аномальные значения объясняются уникальностью строения отдельных РС. Так, высокие значения коэффициента (5,0–9,0) характерны для систем 1–3-го порядков и в единичных случаях для средних (4–5-го порядков), что обуславливается большим количеством водно-эрозионных элементов в этих системах. Это подчеркивает значительную расчлененность рельефа и может свидетельствовать об относительной молодости речной сети низких порядков.

Для исследуемой территории частота потока изменяется от 21 до 33 рек на 100 км², эта величина достаточно стабильна и составляет в среднем 25 рек на 100 км². Увеличение частоты потока наблюдается на более крутых склонах с небольшим водосборным бассейном, что характерно для РС хр. Хамар-Дабан.

Бассейн оз. Байкал в целом характеризуется коэффициентом эрозионного расчленения рельефа от 0,5 до 0,9 км/км². Наибольшее расчленение

свойственно элементарной водно-эрозионной сети (1-го и 2-го порядков) и устьевых областей.

Значения ГМК колеблются в диапазоне 15–610 км·с/м³. Максимальные значения ГМК приурочены к областям постоянных опусканий, а минимальные – к морфоструктурам рельефа с наиболее интенсивными поднятиями [Корытный, Безруков, 1990]. Интенсивное воздымание территории приводит к усилению глубинной эрозии и ослаблению планового развития водно-эрозионных элементов. Действительно, для областей с наименьшим значением ГМК характерна наибольшая глубина эрозионного вреза. Максимальные значения ГМК повсеместно наблюдаются в бассейне р. Селенги (до 610 км·с/м³), а также свойственны РС Приморского хребта (до 300 км·с/м³, за исключением р. Сармы), РС Баргузина (110 км·с/м³) и РС Максимихи (213 км·с/м³). Значение ГМК для остальных РС не превышает 100 км·с/м³. Следует предположить, что РС с наименьшим значением ГМК и высоким значением глубины эрозионного вреза относятся к молодой стадии развития РС, а с наибольшим значением ГМК, но с преобладанием боковой эрозии соответствует древней стадии. Наиболее древние РС дренируют западные склоны байкальского обрамления (реки Анга, Бугульдейка), к классу таких систем относится и р. Селенга [Гидроклиматические исследования ... , 2013]. Речные системы юго-восточного и северного макросклонов Байкала – относительно молодые (Утулик, Тья, Верхняя Ангара, Турка и др.).

Количественной характеристикой степени разнообразия строения РС выступает структурная мера – суммарная энтропия. Минимальные значения суммарной энтропии отмечены у малых речных систем с небольшой протяженностью и незначительными водосборами, достаточно быстро достигающие своего порядка (большая часть РС хребтов Хамар-Дабан и Улан-Бургасы). Наибольшие значения этого показателя фиксируются у РС с большой протяженностью и значительными площадями водосбора, занимающих понижения земной поверхности. Свой порядок такие РС достигают на значительном удалении от истоков, принимая достаточно большое количество притоков младших порядков (РС Селенги, РС котловин байкальского типа).

Установленные индикационные зависимости между суммарной энтропией и средними многолетними расходами воды представляет семейство лучей [Антипов, Абасов, Бережных, 2003], соответствующих определенному району, характеризующемуся однотипным набором физико-географических, геолого-геоморфологических, гидрологических и структурных условий. Вся исследуемая территория обладает рассчитанными структурными параметрами во всех точках слияния водотоков. Пространственное распределение среднего структурного модуля представлено на рис.

Пространственное распределение максимальной водоносной способности речных систем бассейна оз. Байкал (табл. 2) крайне сложное и определяется совокупностью морфометрических и структурно-гидрографических характеристик бассейна и русловой сети, а также согласуется с общей дифференциацией осадков по территории [Амосова, Ильичева, 2019].

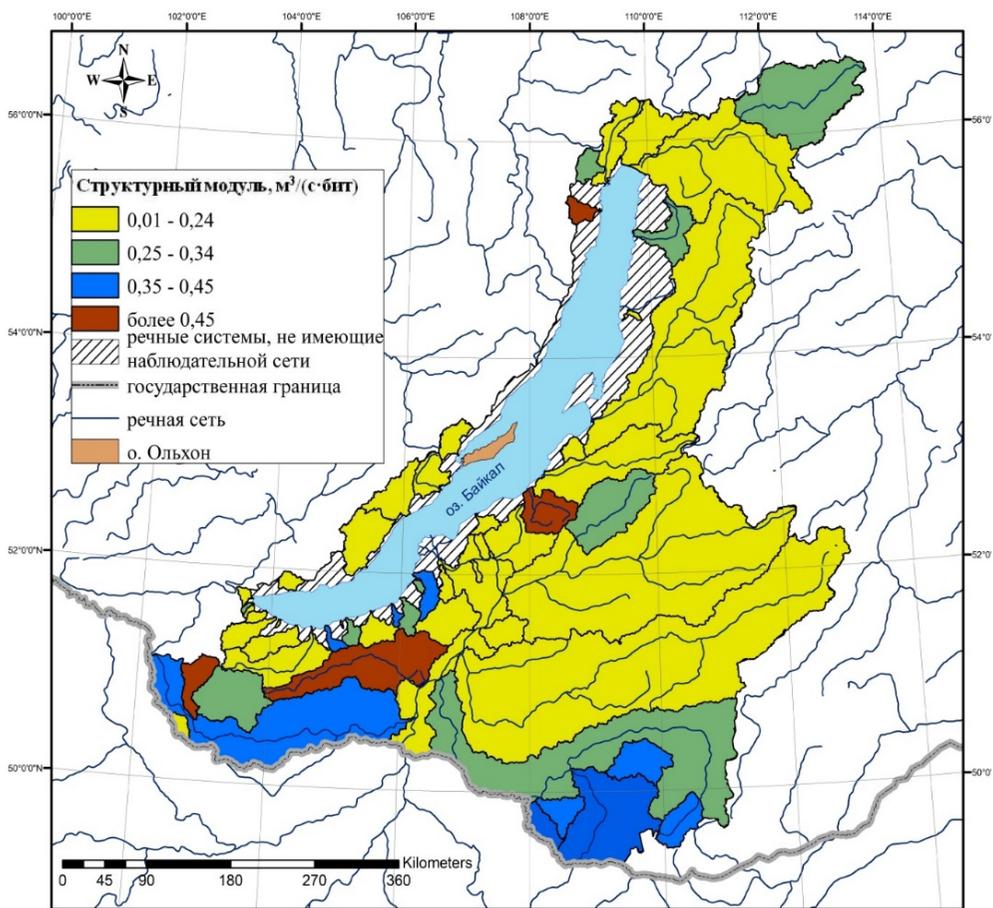


Рис. Пространственное распределение среднего структурного модуля в бассейне оз. Байкал

Таблица 2

Пространственная дифференциация максимальной водоносной способности речных систем бассейна оз. Байкал

Речные системы			
Приморского хребта	Баргузинского хребта	котловин байкальского типа	Бассейна р. Селенги
	Байкальского хребта	хр. Хамар-Дабан	
	хр. Улан-Бургасы		
Осадки (в среднем по территории), мм [Ресурсы поверхностных вод ... , 1973]			
300	475	613	300
Максимальная водоносная способность, м ³ /с			
< 1000	1000–1500	1501–5000	> 5000

Наибольшей водоносной способностью обладают РС суббассейна р. Селенги за счет значительной площади бассейна – 80 % водосборной площади оз. Байкал. В свою очередь РС котловин байкальского типа (реки Верхняя Ангара и Баргузин) и первичных наветренных северо-западных склонов хр. Хамар-Дабан также отличаются большей величиной водоносной способности. РС первичных подветренных склонов Приморского хребта имеют наименьшую водоносную способность (до 1000 м³/с). Максимальная водоносная способность РС, дренирующих вторичные наветренные склоны Баргузинского хребта и хр. Улан-Бургасы и юго-восточные склоны Байкальского хребта, составляет 1000–1500 м³/с.

Заключение

Главной отличительной особенностью речных систем с близкими гидролого-морфометрическими характеристиками в сходных физико-географических условиях является рисунок русловой сети как первичный индикатор водоносности, что позволяет рассматривать речные системы как водно-эрозионную сеть на структурно-гидрографическом уровне.

Ограниченность наблюдений за осадками, а в большинстве районах исследования и полное отсутствие таких наблюдений не позволяют дать исчерпывающую характеристику распределения осадков и построить зависимость со стоком. В отдельных случаях осадки, вызванные затяжными дождями, превышают месячную, а иногда и среднюю сезонную нормы. Поэтому максимальная водоносная способность речных систем рассматривается как максимально возможный экстремальный сток, который водно-эрозионная сеть будет транспортировать в периоды интенсивного и экстремального увлажнения в зависимости от строения водосборного бассейна и водно-эрозионной сети.

Исследование выполнено за счет средств государственного задания (№ госрегистрации темы АААА-А17-117041910172-4) при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 17-29-05052-офи_м.

Список литературы

Алексеевский Н. И., Айбулатов Д. Н., Косицкий А. Г. Масштабные эффекты изменения стока в русловой сети территории // География, общество, окружающая среда. Т. 6. Динамика и взаимодействие атмосферы и гидросферы. М.: Городец, 2004. С. 345–374.

Алексеевский Н. И., Ретеюм К.Ф., Чуткина Л. П. Индикационные методы для решения гидрологических задач в бассейне р. Оки // Вестник МГУ. Серия 5, География. 1998. № 3. С. 39-43

Аллисон А., Палмер Д. Геология. М.: Мир, 1984. 568 с.

Амосова И. Ю., Ильичева Е. А. Пространственная дифференциация максимальной водоносной способности речных систем бассейна озера Байкал // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: материалы II Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 2019. С. 298–302.

Амосова И. Ю., Ильичева Е. А. Структурно-гидрографический анализ речных систем бассейна озера Байкал // Вестник Бурятского государственного университета. Биология. География. 2017. № 4. С. 16–23.

Антипов А. Н., Абасов Н. В., Бережных Т. В. Географические закономерности гидрологических процессов юга Восточной Сибири. Иркутск : Институт географии СО РАН, 2003. 208 с.

Антипов А. Н., Кoryтный Л. М. Географические аспекты географических исследований (на примере речных систем Южно-Минусинской котловины). Новосибирск : Наука, 1981. 177 с.

Афанасьев А. Н. Водные ресурсы и водный баланс бассейна озера Байкал. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1976. 238 с.

Гарцман И. Н. Топология речных систем и гидрографические индикационные исследования // Водные ресурсы. 1973. № 3. С. 109–124.

Гарцман И. Н., Казанский Б. А., Кoryтный 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.

Гарцман Б. И. Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска. Владивосток : Дальнаука, 2008. 223 с.

Гидроклиматические исследования Байкальской природной территории / отв. ред. Л. М. Кoryтный. Новосибирск : Гео, 2013. 187 с.

Казанский Б. А. Топологические характеристики водосборов // Климат и воды Сибири. Новосибирск : Наука, 1980. С. 219–227.

Карасев М. С., Худяков Г. И. Речные системы: На примере Дальнего Востока. М. : Наука, 1984. 143 с.

Кoryтный Л. М. Классификация речных систем Сибири по их величине // География и природные ресурсы. 1985. № 4. С. 32–36.

Кoryтный Л. М. Морфометрические характеристики речного бассейна // География и природные ресурсы. 1984. № 3. С. 105–112.

Кoryтный Л. М., Безруков Л. А. Водные ресурсы Ангаро-Енисейского региона (геосистемный анализ). Новосибирск : Наука, 1990. 214 с.

Лобанова Н. И. Структура речной сети юга Дальнего Востока и индикационная оценка ее средней водоносности // Тр. / ДВНИГМИ. Л. : Гидрометеоздат, 1977. Вып. 66 : Системный анализ гидрометеорологических явлений и процессов. С. 53–76.

Орлов В. Г. Некоторые закономерности строения речной сети бассейна р. Камчатки // Исследование формирования речного стока и его расчеты : межведомств. сб. Ленингр. гидрометеорол. ин-та. Л., 1981. С. 51–56.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Л. : Гидрометеоздат, 1973. Т. 16, вып. 3. 400 с.

Хортон Р. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. Гидрофизический подход к количественной морфологии. М. : Гос. изд-во иностр. лит., 1948. 158 с.

Чеботарев А. И. Гидрологический словарь. Л. : Гидрометеоздат, 1978. 76 с.

Scheidegger A. E. On the topology of river nets // Water. Res. Res. 1964. Vol. 3, N 1. P. 3–6.

Schreve R. L. Infinite topologically random channel networks // Y. Geol. 1967. Vol. 75, N 2. P. 178–186.

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

Spatial Distribution of Structural and Hydrographic Characteristics of River Systems in the Lake Baikal Basin

I. Y. Amosova

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

E. A. Ilicheva

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

Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. Analysis of structural and hydrographic characteristics of the structure of river systems and their interconnections was carried out for the future use in calculating runoff and the conditions of its formation for unexplored rivers. An annual normal and maximum water discharge observed in the 96 gauging sections of the standard observation network are hydrological basis. The research of river systems was carried out on the basis of topographic maps of scales of 1: 500 000 and 1: 200 000 and radar topographic surveys, which became the basis for constructing static and dynamic models of river systems. The static model is a totality of permanent watercourses and reflects the conditions of continuous flow. The system of impermanent and episodic watercourses is filled in the period of extreme flow. At this time, earlier element of the channel network without inflow become elements of a higher order. This model is dynamic. The study was conducted for the river systems of the Russian part of the Baikal basin. All parameters of river systems and their basins are divided into simple, structural and expositional classes, characterizing the conditions for the formation of thalwegs and runoff. The seven areas are identified which combine river systems when studying complex of the calculated parameters. The average structural module is a criterion for the distribution of the study territory into homogeneous area for the calculation of water discharge. The average structural module is determined by the local relation of annual normal water discharge on the total entropy of river systems. This relationship allows runoff calculations for watercourses that are not provided with hydrological information. In connection with this, a new stage of studies of the relationships between the characteristics of the structural class of the water-erosion network and the parameters of the river basin as an indicator of maximum aquifer ability arises.

Keywords: water and erosion network, Lake Baikal, river systems, river network structure, structural and hydrographic characteristics, structural module.

For citation: Amosova I.Y., Ilicheva E.A. Spatial Distribution of Structural and Hydrographic Characteristics of River Systems in the Lake Baikal Basin. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2020, vol. 34, pp. 21-36. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.34.21> (in Russian)

References

Alekseevskij N.I., Ajbulatov D.N., Kosickij A.G. Masshtabnye jeffekty izmenenija stoka v ruslovoj seti territorii [Large-scale effects of changes in runoff in the channel network of the territory]. *Dinamika i vzaimodejstvie atmosfery i gidrosfery* [Dynamics and interaction of the atmosphere and the hydrosphere]. Moscow, Gorodec Publ., 2004, pp. 345-374. (in Russian)

Alekseevskij N.I., Retejum K.F., Chutkina L.P. Indikacionnye metody dlja reshenija gidrologicheskikh zadach v bassejne r. Oki [Indicative methods for solving hydrological problems in the Oka river basin]. *Vestnik MGU. Serija 5. Geografija* [Moscow University Bulletin. Series 5. Geography], 1998, no. 3, pp. 39-43. (in Russian)

Allison A., Palmer D. *Geologija* [Geology]. Moscow, Mir Publ., 1984, 568 p. (in Russian)

Amosova I.Ju., Il'icheva E.A. Prostranstvennaja differenciacija maksimal'noj vodonosnoj sposobnosti rechnyh sistem bassejna ozera Bajkal [Spatial distribution of the maximum water-carrying capacity of the river systems of the Lake Baikal basin]. *Materialy II Vserossijskoj*

nauchno-prakticheskoj konferencii "Sovremennye tendencii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii" [Proceedings of the Second All-Russian Scientific and Practical Conference "Current Trends and Prospects for the Development of Hydrometeorology in Russia"]. Irkutsk, 2019, pp. 298-302. (in Russian)

Amosova I.Ju., Il'icheva E.A. Strukturno-gidrograficheskiy analiz rechnyh sistem bassejna ozera Bajkal [Structural and hydrographic analysis of river systems in the basin of Baikal Lake]. *Vestnik Burjatskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologija. Geografija* [Bulletin of the Buryat State University. Biology. Geography], 2017, no. 4, pp. 16-23. (in Russian)

Antipov A.N., Abasov N.V., Bereznyh T.V. *Geograficheskie zakonomernosti gidrologicheskikh processov juga Vostochnoj Sibiri* [Geographic patterns of hydrological processes in the south of Eastern Siberia]. Irkutsk, Institut geografii SB RAS Publ., 2003, 208 p. (in Russian)

Antipov A.N., Korytnyj L.M. *Geograficheskie aspekty geograficheskikh issledovanij (na primere rechnyh sistem Juzhno-Minusinskoj kotloviny)* [Geographic patterns of hydrological processes in the south of Eastern Siberia (on the example of the river systems of the Yuzhno-Minusinsk depression)]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 177 p. (in Russian)

Afanasiev A.N. *Vodnye resursy i vodnyi balans bassejna ozera Bajkal* [Water Resources and Water Balance of the Lake Baikal Basin]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1976, 238 p. (in Russian)

Garcman I.N. Topologija rechnyh sistem i gidrograficheskie indikacionnye issledovanija [River Systems Topology and Hydrographic Indicator Studies]. *Vodnye resursy* [Water resources], 1973, no. 3, pp. 109-124. (in Russian)

Garcman I.N., Kazanskij B.A., Korytnyj L.M. Strukturnaja mera rechnyh sistem i ee indikativnye svojstva (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'skogogidrometeorologicheskogo instituta* [Proceedings of the Far Eastern Regional Scientific Research Hydrometeorological Institute]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1976, vol. 49, pp. 54-60. (in Russian)

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

Korytnyj L.M. (ed.) *Gidroklimaticheskie issledovanija Bajkalskoj prirodnoj territorii* [Hydroclimate studies of the Baikal natural territory]. Novosibirsk, Geo Publ., 2013, 187 p. (in Russian)

Kazanskij B.A. Topologicheskie harakteristiki vodosborov [Topological characteristics of catchments]. *Klimat i vody Sibiri* [Siberia climate and waters]. Novosibirsk, Geo Publ., 1980, pp. 219-227. (in Russian)

Karasev M.S., Hudjakov G.I. *Rechnye sistemy: Na primere Dalnego Vostoka* [River Systems: on the example of the Far East]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 143 p. (in Russian)

Korytnyj L.M. Klassifikacija rechnyh sistem Sibiri po ih velichine [Classification of the river systems of Siberia by their size]. *Geografija i prirodnye resursy* [Geography and Natural Resources], 1985, no. 4, pp. 32-36. (in Russian)

Korytnyj L.M. Morfometricheskie harakteristiki rechnogo bassejna [Morphometric characteristics of the river basin]. *Geografija i prirodnye resursy* [Geography and Natural Resources], 1984, no. 3, pp. 105-112. (in Russian)

Korytnyj L.M., Bezrukov L.A. *Vodnye resursy Angaro-Enisejskogo regiona (geosistemnyj analiz)* [Water resources of the Angara-Yenisei region (geosystem analysis)]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990. 214 p. (in Russian)

Lobanova N.I. Struktura rechnoj seti juga Dalnego Vostoka i indikacionnaja ocenka ee srednej vodonosnosti [The structure of the river network in the south of the Far East and indicative estimation of its average water-carrying capacity]. *Trudy Dalnevostochnogo regionalnogo nauchno-issledovatel'skogogidrometeorologicheskogo instituta* [Proceedings of the Far

Eastern Regional Scientific Research Hydrometeorological Institute]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1977, vol. 66, pp. 53-76. (in Russian)

Orlov V.G. Nekotorye zakonomernosti stroenija rechnoj seti bassejna r. Kamchatki [Some patterns in the structure of the river network of the Kamchatka river basin]. *Issledovanie formirovanija rechnogo stoka i ego raschety. Mezhdokumentnyj sbornik Leningradskogo gidrometeorologicheskogo institute* [Study of the formation of river runoff and its calculations. Interdepartmental collection of the Leningrad Hydrometeorological Institute], 1981, pp. 51-56. (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)

Horton R. *Jerozionnoe razvitie rek i vodosbornyh bassejnov. Gidrofizicheskij podhod k kolichestvennoj morfologii* [Erosion development of rivers and catchments. Hydrophysical approach to quantitative morphology]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatelstvo inostrannoj literatury Publ., 1948, 158 p. (in Russian)

Chebotaev A.I. *Gidrologicheskij slovar* [Hydrological Dictionary]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1978, 76 p. (in Russian)

Scheidegger A.E. On the topology of river nets. *Water. Res. Res.*, 1964, vol. 3, no. 1, pp. 3-6.

Schreie R.L. Infinite topologically random channel networks. *Y. Geol.*, 1967, vol. 75, no. 2, pp. 178-186.

Strahler A.N. Hypsometric (area – altitude) analysis of erosional topography. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1952, vol. 63, pp. 1117-1142.

Амосова Ирина Юрьевна

*инженер 1-й категории, лаборатория гидрологии и климатологии
Институт географии им. В. Б. Сочавы
СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 1
e-mail: irinaamosova_83@mail.ru*

Amosova Irina Yurievna

*Engineer of 1 Category, Laboratory of Hydrology and Climatology
V. B. Sochava Institute of Geography
SB RAS
1, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
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*

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: 25.00.27

Дата поступления: 31.08.2020