

ГЕОМОРФОЛОГИЯ

УДК 551.4:571.6

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ ОЙНА-ХАРАЛЬСКОГО РУДНОГО УЗЛА (ТУВА)

С.А. Чупикова¹, С.Г. Прудников¹, И.К. Андронаке²

¹ Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия

² Бухарестский университет, Бухарест, Румыния



Представлены результаты морфометрического и фрактального анализа речных бассейнов Ойна-Харальского рудного узла с использованием инструментария геоинформационных систем. Получены морфометрические и фрактальные модели рек. Анализ индекса равновесия для бассейнов рек Харал и Оо-Хем указывает на то, что все реки не находятся в равновесии, имеют относительную степень недоразвития, кроме р. Чайынды, которая переразвита ($I_n = 1,4$). Это состояние дисбаланса подтверждается фрактальным анализом, где бассейны рек 4-го порядка имеют потоки порядка 4 с фрактальной размерностью выше потоков 3-го порядка.

Ключевые слова: морфометрические характеристики, модель дренажа, водосборный бассейн, порядок рек, Тува.

Введение

Разработка месторождений и добыча полезных ископаемых проводятся при активной антропогенной нагрузке на окружающую среду. В местах добычи идет воздействие на рельеф, бассейновая организация которого во многом определяет процессы переноса и накопления вещества, в том числе поступающего от хозяйственной деятельности. Интенсивное эрозионное расчленение и высокая динамика рельефообразующих процессов наряду с интенсивной антропогенной нагрузкой определяют формирование эколого-геоморфологического состояния территории. Изучение структуры речных бассейнов позволяет выявлять основные закономерности распределения потоков вещества в пространстве и времени на разных иерархических уровнях. Полученные знания используются в целях морфоструктурного анализа, восстановления истории развития рельефа. Для более детального анализа речных бассейнов в настоящее время применяются возможности геоинформационных систем (ГИС) и методы фрактальной геометрии [Фрактальный..., 2013].

Объектом исследования являются речные бассейны Ойна-Харальского рудного узла, в котором с начала XX в. ведется добыча россыпного золота. В районе известны крупные россыпные месторождения золота рек Оо-Хем, Ойнаа, Демиржи, Харал и их притоков (рис. 1). Россыпи в основном отработаны, относятся к долинным, террасовым и техногенным типам россыпей. В структурном отношении Ойна-Харальский рудный узел охватывает Харальский выступ байкалит, сложенный позднепротеро-

зойскими терригенными и вулканогенно-осадочными отложениями харальской и охемской свит, прорванными субвулканическими и жерловыми образованиями позднепротерозойского харальского комплекса и субвулканическими интрузиями диабазов, диабазовых порфириров, гранит-порфириров кембрийского и девонского возрастов. Золотое оруденение локализовано в кварцевых жилах, сульфидизированных метасоматических кварцитах и кварц-полевошпатовых метасоматитах, в толще графитистых сланцев и относится к золото-кварцевой, золото-кварцовой, золото-сульфидно-кварцевой и золото-сульфидно-углеродистой формациям [Рудные..., 1981].

Фрактальный анализ является относительно новым подходом для исследования водосборных бассейнов. Термин «фрактал» образован от лат. fractus («прерывать, создавать нерегулярные дробления»). Под фрактальностью понимают свойство природы повторяться в разных масштабах пространства и времени, она помогает лучше понять природу объекта. «Фрактальное множество» – это математическое понятие, а «естественный фрактал» – это природный феномен, который может быть представлен фрактальным множеством. В работе [Мандельброт, 2002] впервые была высказана идея исследования разветвленных (речные, эрозионные сети, береговые линии), а также площадных (острова, озера, горные области) географических объектов методами фрактального анализа. В качестве примеров проведены математические вычисления показателей фрактальной размерности этих объектов. Фрактальный анализ позволяет выявлять количественные связи меж-

ду переменными, характеризующими природную систему, и проводить сравнительный анализ пространственно-временной организации таких систем, независимо от природы их происхождения [Мандельброт, 2002]. Фрактальная размерность – это мера сложности, степень, с которой фрактал заполняет пространство, определяя неравномерность и фрагментацию геометрической структуры природного объекта. Обычно его фактическое значение выше, чем топологическое измерение. Фрактальный анализ использовался в географических исследованиях, связанных с обезлесением и развитием лесов в Румынии [Andronache et al., 2016; Andronache et al., 2019; Diaconu et al., 2019].

Установлено [Аюнова и др., 2018], что показатели фрактальной размерности, определенной для речной и разломных сетей морфоструктурных блоков Саяно-Тувинского нагорья, выделяют зоны высокой сейсмической активности территории максимумами значений. В недавнем исследовании [Diaconu et al., 2017] была предложена модель для анализа сложности водосбора с использованием фрактального анализа. Применение современных технологий и фрактальной геометрии для построения моделей речных систем может служить (инструментом) средством решения задачи их детального и всестороннего изучения и моделирования различных процессов, происходящих на реках.

Цель статьи – морфометрический и фрактальный анализ речной сети Ойна-Харальского рудного узла на основе классификации Хортон–Стралера для выявления качественных и количественных изменений водосборного бассейна.

Объект и методы исследования

Основными водными артериями района исследования являются реки Харал и Оо-Хем, левые притоки р. Большой Енисей (Бий-Хем). В структурах современного рельефа бассейны рек находятся в переходной зоне от высокогорных хребтов Шорлыковские Белки и Ондут-Тайга, входящих в систему хр. Академика Обручева, к Тоджинской котловине. Рельеф в бассейнах рек Харал и Оо-Хем среднегорный слаборасчлененный, с пологими склонами, от абсолютных отметок 1 800–2 000 м на юге он постепенно выполаживается до 900–1 100 м в низовьях рек на севере. Все реки района относятся к типично горным, молодой стадии развития, характеризуются бурными водотоками, значительными уклонами долин, резким колебанием дебита. Все питаются за счет таяния мерзлоты и атмосферных осадков.

Река Оо-Хем образуется от слияния рек Ойнаа и Шеннелиг. Общая протяженность р. Оо-Хем и ее правой составляющей – р. Ойнаа около 70 км, базисом эрозии является устье с отметкой 951,4 м. Река

Ойнаа берет начало из межгорной котловины, прилегающей к северному борту хр. Академика Обручева, и на протяжении около 20 км течет в северо-западном направлении. Форма долины ящикообразная. Ширина днища 150–180 м, в суженных частях – 80–100 м. Ниже устья р. Шеннелиг, где начинается собственно р. Оо-Хем, на протяжении около 15 км река протекает в меридиональном направлении, которое затем сменяется на северо-восточное. Долина р. Оо-Хем ящикообразная и характеризуется простым симметричным строением. Она глубоко врезана в коренные породы: превышение водоразделов над поймой составляет 500–600 м. В поперечном разрезе долины выделяются сравнительно крутые склоны гравитационно-делювиального сноса и плоское дно, как правило, занятое поймой. Надпойменные террасы не характерны. Пойма постепенно расширяется вниз по течению. Если в верхней части ширина поймы не превышает 150–200 м, то в среднем течении она расширяется до 900–1 200 м и достигает 3 000 м в нижнем течении. Основные притоки – реки Кара-Адыр, Ак-Хем, Демиржи, Биче Демиржи.

Река Харал начинается от слияния рек Кара-Хем и Чайынды. Общая длина р. Харал с ее левой составляющей р. Кара-Хем достигает 90 км, базисом эрозии является устье с отметкой 1 000 м. Основная составляющая – р. Кара-Хем – берет свое начало в высокогорной гольцовой области, на северных склонах хр. Академика Обручева, являющегося водоразделом между Бий-Хемом и Каа-Хемом. В среднем течении в р. Харал впадают реки Шорлуг, Тылба, Хадын и крупные ручьи Эк, Сумасшедший, Хина, Конопка, Ивановский, Степановский, Сафьяновский. В общей схеме речной сети района система р. Харал занимает особое положение. Долина р. Харал состоит из трех разнородных участков: верхнего (долины рек Кара-Хем, Сай-Кежиг и Чайынды), представляющего собой днище древнего Верхнехаральского приледникового озера и еще недавно (до верхнеплейстоценового оледенения) входившего в систему реки Серлиг-Хем; нижнего (меридионального), наиболее древнего, являющегося продолжением долины р. Шорлыг; и соединяющего их среднего, представляющего собой юное ущелье, возникшее в результате речного перехвата – похищения одним из правых притоков Харала верховий р. Серлиг-Хем. Для Харальского ущелья длиной 10 км характерен V-образный профиль с глубиной вреза, достигающей 150–200 м, резко выраженными бровками и скалистыми склонами, которые падают под углом 50–70° к узкому днищу, целиком занятому водоток. В верхней части находится несколько порогов-водопадов, следующих один за другим высотой 2–5 м каждый. Описанный выше перехват обязан перестройке долинной сети, произошедшей в верхне-

плейстоценовое время в связи с таянием ледникового покрова Азасского ледника [Гросвальд, 1965]. Образование Харальского ущелья, которое можно считать долиной прорыва, связано с эрозией, производимой сбрасываемыми водами древнего ледникового озера, существовавшего в пределах Серлигхемской впадины. Таким образом, бассейн р. Харал фактически включает в себя две долинные сети – р. Палео-Кара-Хем и р. Палео-Шорлыг. Вершиной р. Харал до образования Харальского ущелья являлась современная р. Шорлыг.

По характеру рисунка речной сети речная система р. Оо-Хем относится к древовидному типу. Речная система р. Харал комбинированного типа: в верхней части (Кара-Хем, Чайынды) – древовидного типа, в нижней части (ниже Харальского ущелья) – перистого типа, что также подтверждает ее принадлежность к изначально разным речным системам.

Методология исследования основывается на морфометрическом анализе речных бассейнов (Хортон-анализе). Программное обеспечение ГИС использовалось для оцифровки и статистических расчетов интересующих параметров. Анализ проводился по картам (в формате *.shp), оцифрованным в масштабе 1 : 100 000. Исследуемые морфометрические характеристики, такие как число, порядки потоков, их длина, были напрямую рассчитаны в программном обеспечении. Показатель фрактальной размерности вычислен с использованием программного обеспечения «Фрактальная размерность речной сети» [Калуш, Логинов, Чупикова, 2006], разработанного с участием авторов. Статистическая обработка данных проведена в программе Microsoft Office Excel. Классификация речного бассейна по порядкам выполнялась с использованием системы Хортон–Стралера [Хортон, 1948; Ржаницын, 1960]. Данная система построения иерархии водотоков позволяет провести фрактальный анализ, дает возможность статистически обработать полученные данные по порядкам рек и выполнить сравнительный анализ. В работе была использована новая морфометрическая модель: фрактальная дренажная модель [Diaconu et al., 2017], прошедшая апробацию на водоразделе Жижилы (Румыния), Харал (Россия, Тува) [Чупикова, Андронаке, 2019].

Морфометрическая модель представляет морфометрические процедуры для получения количественной информации об изучаемых процессах или явлениях. Система классификации Хортон–Стралера и вытекающие из нее морфометрические связи были проверены для бассейнов р. Харал и р. Оо-Хем. В системе Хортон–Стралера первый порядок присваивается элементарным водотокам, которые имеют способность организовать сток и не получают других притоков, в то время как все количество воды отводится одним главным потоком, который имеет самый высокий порядок. Для создания мор-

фометрической модели дренажа необходимо: количество участков реки, N ; сумма длин отрезков реки, L (км); средняя длина реки отрезки, l (км). Эти параметры составляют строки значений, расположенных в виде геометрических прогрессий. Измерения исследуемых параметров, таких как число, длина, средняя длина (сумма длина/число) речных водотоков – по классификации Хортон–Стралера, и вычисления показателей бифуркации, плотности дренажа речных водотоков проводились с применением инструментария геоинформационных систем. В работе мы в основном придерживались методики, изложенной в статье [Diaconu et al., 2017].

Вначале определяется количество речных водотоков, затем количество речных водотоков каждого порядка и соотношение слияния R_C :

$$R_C = \frac{\left[\left(\frac{N_{m1}}{N_{m2}}\right) + \left(\frac{N_{m2}}{N_{m3}}\right) + \left(\frac{N_{m3}}{N_{m4}}\right)\right] \times [(N_{m1} + N_{m2}) + (N_{m2} + N_{m3})(N_{m3} + N_{m4})]}{(N_{m1} + N_{m2}) + (N_{m2} + N_{m3})(N_{m3} + N_{m4})} \quad (1)$$

$$N_{Ci} = \frac{N_{m3}}{R_C^{i-3}}, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (2)$$

Суммируя длины сегментов водотоков различных порядков в пределах водосборного бассейна, получаем серию суммированных длин по отношению к порядку. Рассчитав отношение этой прогрессии как средневзвешенное значение парциальных соотношений, последний обозначаем как R_L :

$$R_L = \frac{\left[\left(\frac{L_{m1}}{L_{m2}}\right) + \left(\frac{L_{m2}}{L_{m3}}\right) + \left(\frac{L_{m3}}{L_{m4}}\right)\right] \times [(L_{m1} + L_{m2}) + (L_{m2} + L_{m3})(L_{m3} + L_{m4})]}{(L_{m1} + L_{m2}) + (L_{m2} + L_{m3})(L_{m3} + L_{m4})} \quad (3)$$

$$L_{Ci} = \frac{L_{m3}}{R_L^{i-3}}, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (4)$$

С учетом законов порядков водотоков и суммированных длин водотоков последовательных порядков в данном дренаже (речной системе), можно вывести закон средней длины. Соотношения последовательных значений, определяющих две серии, образуют новый геометрический ряд. Средние длины отрезков водотока последовательно более высоких порядков в бассейне имеют тенденцию приближаться к возрастающему геометрическому ряду, в котором первым членом 1 является средняя длина сегментов первого порядка [Хортон, 1948; Strahler, 1952]. Отношение R_L последовательных средних длин можно снова установить, рассчитав средневзвешенное значение парциальных соотношений или их среднее арифметическое или установив наклон линии, проведенной через измеренные точки.

$$R_L = \frac{\left[\left(\frac{L_{m1}}{L_{m2}}\right) + \left(\frac{L_{m2}}{L_{m3}}\right) + \left(\frac{L_{m3}}{L_{m4}}\right)\right] \times [(L_{m1} + L_{m2}) + (L_{m2} + L_{m3})(L_{m3} + L_{m4})]}{(L_{m1} + L_{m2}) + (L_{m2} + L_{m3})(L_{m3} + L_{m4})} \quad (5)$$

$$l_{Ci} = \frac{l_{m3}}{R_L^{i-3}}, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (6)$$

где m – это измеренные с применением инструментария геоинформационных систем значения; вычисленные значения рассчитываются с использованием коэффициента, полученного посредством взвешенного арифметического среднего; R_C – коэффициент речных водотоков; R_L – отношение длины отрезка реки; R_L – отношение средней длины речных водото-

ков; N_i – количество речных водотоков с 1-го по 4-й порядок; L_i – сумма длин речных водотоков i -го порядка; I_i – сумма средней длины речных водотоков i -го порядка: $i = 1, 2, 3, 4$.

Закон суммируемых длин убывающий, а закон средних длин – увеличивающейся геометрической прогрессии, поэтому отношение R_L последовательных суммированных длин всегда должно быть меньше, чем R_C . Если R_L были бы равны R_C , тогда rl был бы равен единице, а средние длины сформировали бы постоянный ряд, что невозможно в реальности. Аналогично, если бы R_L было больше, чем R_C , их отношение было бы ниже единицы, а закон средних длин – убывающая прогрессия. Соотношение суммарных длин не может быть меньше или равно единице, так как в этом случае закон суммированных длин больше не будет убывающей прогрессией, следовательно $1 < R_L < R_C$ [Milton, 1966].

Морфометрический анализ дренажа помогает установить текущую стадию равновесия или дисбаланс бассейна, а также будущие тенденции развития [Gresu, Palmentola, 2003] и рассчитывается с использованием уравнения

$$I_n = N_{n-1}/R_C, \quad (7)$$

где I_n – индекс равновесия водосбора, N_{n-1} – представляет значение предпоследнего члена в каждой прогрессии, R_C – коэффициент соотношения слияния водотоков реки [Gresu, Palmentola, 2003]. Когда $I_n = 1$, водосборный бассейн находится в равновесии; при $I_n < 1$ бассейн находится в дисбалансе, недостаточно развит; если $I_n > 1$, то бассейн все еще находится в дисбалансе, но чрезмерно развит.

В качестве нового подхода в работе [Diaconu et al., 2017] предлагается фрактальная модель дренажа с учетом порядков рек. Для расчета фрактальных показателей речной сети использовался модифицированный клеточный метод, на основе которого создана программа «Фрактальная размерность речной сети» [Калуш, Логинов, Чупикова, 2006]. Особенностью программы является возможность работы с данными ГИС. Применение геоинформационных технологий обеспечивает эффективность анализа фрактального показателя речной сети в географической системе координат. Полученные файлы, с координатами кривых, преобразовывались в текстовый формат с расширением *.txt и импортировались в программу «Фрактальная размерность речной сети». На основе фрактальных измерений нами предлагается новая морфометрическая модель – модель фрактального дренажа, которая базируется на следующих уравнениях:

$$R_{FD} = \frac{\left(\frac{DB_{m1}}{DB_{m2}}\right) + \left(\frac{DB_{m2}}{DB_{m3}}\right) + \left(\frac{DB_{m3}}{DB_{m4}}\right) \times [(DB_{m1}+DB_{m2}) + (DB_{m2}+DB_{m3}) + (DB_{m3}+DB_{m4})]}{(DB_{m1}+DB_{m2}) + (DB_{m2}+DB_{m3}) + (DB_{m3}+DB_{m4})} \quad (8)$$

$$FD_{ci} = \frac{DB_{ms}}{R_{FD}^{i-s}}, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (9)$$

где m – измеренные (реальные) значения; s – вычисленные (с использованием соотношений, полученных взвешенным среднеарифметическим); R_{FD} – отношения фрактальных размеров сегментов реки (речных потоков); FD_i – фрактальная размерность участков реки i^{th} -го порядка (речных потоков).

Результаты и обсуждение

В принятом масштабе исследования порядок главных рек Харал и Оо-Хем, составляющих Ойна-Харальский рудный узел, рассчитанный по системе Хортон–Стралера, – пятый. Для структурного анализа с использованием модели дренажа использовались показатели рек 4-го порядка. В бассейне реки Харал выделено 4 подбассейна 4-го порядка – это реки Шорлуг, Кара-Хем, Чайынды и Сай-Кежиг. В бассейне реки Оо-Хем пять рек 4-го порядка – Ойнаа, Демержи, Кара-Адыр, Ак-Хем, Шеннелиг (рис. 1).

В результате работы были получены расчетные значения измеренных параметров: числа (количества) водотоков, их длины, средней длины по порядкам рек. Результаты полученных измерений и вычислений сведены в табл. 1, 2.

Как видно из табл. 1, распределение речных отрезков N_i для каждого исследуемого бассейна осуществляется на основе нисходящей геометрической прогрессии с определенным соотношением (коэффициентом) R_C .

Так, на водосборе р. Шорлуг (44 потока рек 1-го порядка, 7 потоков рек 2-го, 3 реки 3-го, 1 отрезок 4-го порядка) с отношением $R_C \sim 5,47$. Для бассейна р. Кара-Хем (65 притоков 1-го порядка, 13 притоков 2-го, 4 притока 3-го и 1 река 4-го порядка) коэффициент R_C равен 4,65. Для бассейна р. Чайынды аналогичные параметры составили 30 притоков 1-го порядка, 22 участка 2-го, 4 притока 3-го и 1 – 4-го порядка, значение R_C равно 2,84. На водосборе р. Сай-Кежиг число притоков по порядкам имеет такие же значения, как и для бассейна р. Шорлуг. Определенные значения коэффициента R_C для интересующих водосборов позволили рассчитать нормальное значение стандартной геометрической прогрессии. В условиях стандартной геометрической прогрессии число водотоков рек 1-го и 2-го порядка для исследуемых бассейнов должно быть больше, 3-го – совпадать с имеющимся, а 4-го порядка – быть меньше. Так, например, для водосбора рек Шорлуг и Сай-Кежиг значение индекса равновесия водосбора (I_n) составляет 0,55. На водосборе реки Кара-Хем (I_n) индекс равен 0,84, а для р. Чайынды – 1,41.

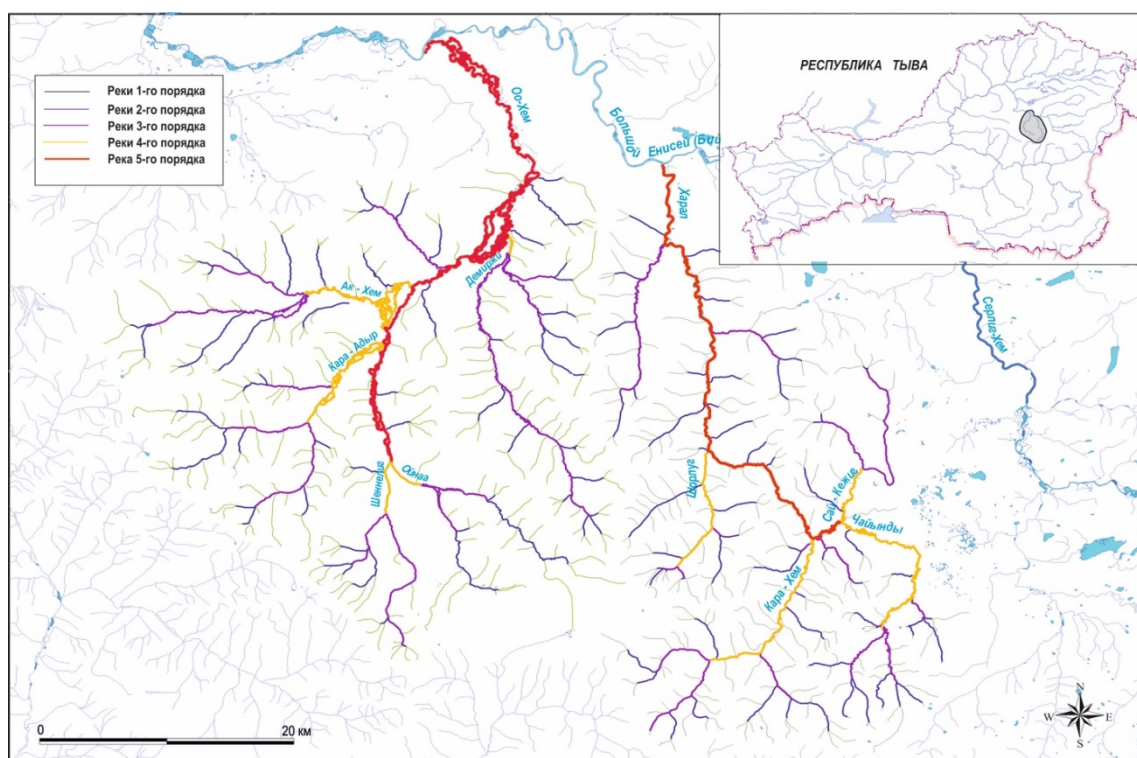


Рис. 1. Объект исследования, порядок рек по классификации Хортон–Стралера

Fig. 1. Object of study, the order of the rivers according to the classification of Horton–Strahler

Таблица 1

Параметры водотоков рек 4-го порядка бассейн р. Харал

Table 1

Parameters of river stream 4 order river basin Charal

Параметр		Порядок рек (<i>i</i>)				Коэффициент <i>R</i>
		1	2	3	4	
р. Шорлуг						
Кол-во водотоков реки (<i>N_i</i>)	Измерено	44	7	3	1	<i>R_c</i> 5,47
	Вычислено	89,9	16,4	3,00	0,55	<i>I_n</i> 0,55
Суммарная длина водотоков, км (<i>L_i</i>)	Измерено	70,0	23,7	6,8	7,2	<i>R_L</i> 2,87
	Вычислено	55,9	19,4	6,8	2,4	
Средняя суммарная длина водотоков, км (<i>l_i</i>)	Измерено	1,56	2,94	2,27	7,16	<i>R_I</i> 0,63
	Вычислено	0,91	1,44	2,27	3,59	
р. Кара-Хем						
Кол-во водотоков рек (<i>N_i</i>)	Измерено	65	13	4	1	<i>R_c</i> 4,65
	Вычислено	86,6	18,6	4,00	0,86	<i>I_n</i> 0,86
Суммарная длина водотоков, км (<i>L_i</i>)	Измерено	126,05	34,3	17,90	17,20	<i>R_L</i> 2,93
	Вычислено	152,7	53,3	17,90	6,1	
Средняя суммарная длина водотоков, км (<i>l_i</i>)	Измерено	1,91	2,29	5,99	17,32	<i>R_I</i> 0,38
	Вычислено	1,023	2,48	5,99	14,49	
р. Чайынды						
Кол-во водотоков реки (<i>N_i</i>)	Измерено	30	11	4	1	<i>R_c</i> 2,84
	Вычислено	32,2	11,4	4,00	1,41	<i>I_n</i> 1,40
Суммарная длина водотоков, км (<i>L_i</i>)	Измерено	62,11	16,2	17,6	21,9	<i>R_L</i> 2,39
	Вычислено	100,7	42,1	17,6	7,4	
Средняя суммарная длина водотоков, км (<i>l_i</i>)	Измерено	1,7	1,5	4,4	21,96	<i>R_I</i> 0,63
	Вычислено	0,42	1,35	4,4	14,3	
р. Сай-Кежиг						
Кол-во водотоков реки (<i>N_i</i>)	Измерено	44	7	3	1	<i>R_c</i> 5,47
	Вычислено	89,9	16,4	3,0	0,55	<i>I_n</i> 0,55
Суммарная длина водотоков, км (<i>L_i</i>)	Измерено	70,0	23,7	6,8	7,2	<i>R_L</i> 2,87
	Вычислено	55,9	19,4	6,8	2,4	
Средняя суммарная длина водотоков, км (<i>l_i</i>)	Измерено	1,56	2,94	2,27	7,16	<i>R_I</i> 0,63
	Вычислено	0,91	1,44	2,27	3,59	

Проведенный анализ для бассейна р. Харал указывает, что все реки, входящие в него, не находятся в равновесии, у них есть относительная степень недоразвития, кроме р. Чайынды, которая переразвита ($I_n = 1,4$). Причиной является то, что современная речная сеть Харала находится в молодой стадии развития, в районе Харальского ущелья продолжается активная глубинная и боковая эрозия, продольный профиль не выработан. Это связано с перестройкой речной сети и перехватом рек, произошедшим в верхнеплейстоценовое время в связи с таянием ледникового покрова Азасского ледника и катастрофическим спуском Верхнехаральского приледникового озера в долину Палео-Шорлуга [Гросвальд, 1965]. Образование Харальского ущелья, которое можно считать долиной прорыва, связано с эрозией, производимой сбрасываемыми водами древнего приледникового озера, существовавшего в пределах Серлигхемской впадины. Современный рисунок гидрографической сети рек в целом отражает изменение активности водно-эрозионных процессов, обусловленное соотношением энергии потоков и сопротивляемости пород, слагающих бассейн [Рудные..., 1981].

Река Чайынды до перехвата рек относилась к более древней и развитой речной системе Палео-Кара-Хема. В связи с чем подтверждаются предположения о общей унаследованности «памяти» в характере и свойствах гидрографической сети [Фрактальный..., 2013].

Основываясь на трех параметрах (см. табл. 1): количестве потоков рек разных порядков, суммарной длины потоков рек и средней суммарной протяженности потоков рек с учетом логарифмической шкалы в программе Microsoft Excel 2007 для каждого бассейна 4-го порядка, была разработана морфометрическая модель дренажа. На рис. 2 изображена морфометрическая модель, полученная для реки Кара-Хем, относящейся к бассейну р. Харал.

Степень баланса водосборов отображается графически пересечением линии суммированных длин с линией суммарной средней длины (см. рис. 2). Для рек Шорлуг, Чайынды и Кара-Хем точка пересечения этих линий соответствует значению абсцисс 3,9–4,0, что составляет более 90% и может свидетельствовать о балансе водосбора. Распределение суммарной средней длины производится на основе возрастающей геометрической прогрессии с определенными отношениями. В условиях стандартной геометрической прогрессии средняя длина сегмента реки 3-го порядка совпадает с вычисленными значениями, а 4-го – несколько больше или меньше измеренной длины. Определение отношения позволило вычислить нормальное значение стандартной геометрической прогрессии для каждого параметра.

Используя программу «Фрактальная размерность речной сети», вычислены показатели фрактальной размерности с 1-го по 4-й порядок всех рек территории исследований. Так, на рис. 3 отражены результаты фрактального анализа р. Кара-Хем, принадлежащей бассейну р. Харал.

Фрактальный анализ притоков рек с 1-го по 4-й порядок отражает, как и в случае морфометрической модели водосбора, баланс гидрографического бассейна. Фрактальная размерность потоков рек 1-, 2- и 3-го порядков показывает естественное нисходящее направление фрактальной размерности с увеличением порядка речных потоков: чем выше порядок, тем меньше число потоков, а также неявно суммированную длину этих потоков. Фрактальная размерность долины Кара-Хем составляет 1,117, а фрактальная размерность речной сети р. Кара-Хем (включая все речные отрезки, без учета их порядка) – 1,275.

Это указывает на высокую степень сложности долины Кара-Хем, порожденную сложной историей развития гидросети Палео-Кара-Хема, начавшуюся с образования Верхнехаральского приледникового озера и, как следствие, повышения базиса эрозии р. Палео-Кара-Хем; затем следовал спуск озера с похищением гидросети рекой Харал и резким понижением базиса эрозии.

Аналогичные вычисления были проведены и для рек 4-го порядка, принадлежащих бассейну реки Оо-Хем (табл. 2).

Согласно данным табл. 2, только для водосборов рек Демержи и Ак-Хем с расчетными значениями речных водотоков 4-го порядка индекс равновесия водосбора (I_n) соответствует 0,76 (Демержи), 0,88 (Ак-Хем), коэффициенты соотношения слияния (R_C) ~ 3,95 и 3,41; подтверждается наличие относительного баланса на данных водосборах.

Из анализа бассейна р. Оо-Хем следует, что не все реки находятся в равновесии, они имеют большую или меньшую степень недоразвития. Причина заключается в том, что современная речная сеть р. Оо-Хем находится в молодой стадии развития, характерной для горных рек.

Изображение морфометрической модели на примере р. Демержи (бассейн) р. Оо-Хем приведено на рис. 4.

Фрактальный анализ притоков реки Демержи 1-, 2-, 3-го порядков выявляет естественную тенденцию к уменьшению фрактальной размерности, одновременно с увеличением порядка притоков реки (чем больше порядок, тем меньше количество притоков этого порядка и меньше их суммарная длина). Тем не менее русло реки 4-го порядка имеет показатель фрактальной размерности незначительно больший, чем аналогичный показатель притоков 3-го порядка, отражая баланс гидрографического бассейна р. Демержи (рис. 5).

Применение инструментария геоинформационных систем позволило более эффективно и быстро извлекать и проводить анализ пространственной информации, главным образом, для идентификации признаков и извлечения информации. Так, были проведены вычисления коэффициента бифуркации и густоты расчленения поверхности (плотность дренажа, табл. 3).

Коэффициент бифуркации, рассчитанный как отношение количества потоков данного порядка N_i к количеству потоков в следующем, более высоком порядке $(N_i + 1)$, и плотность $D = L/S$ дренажа, где D – плотность дренажа; L – длина гидрографической сети; S – поверхность) для рек 4-го порядка, относящихся к бассейну рек Харал и Оо-Хем, приведены в табл. 3.

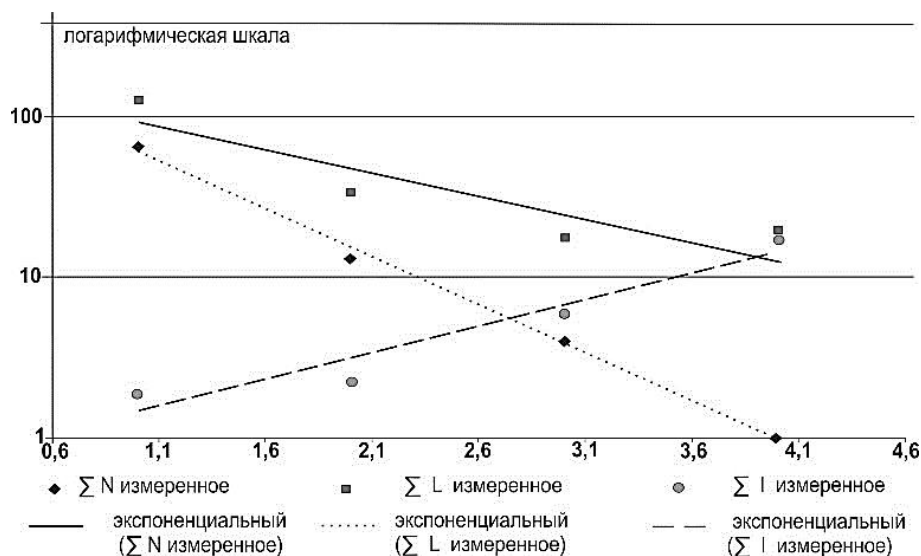


Рис. 2. Морфометрическая модель р. Кара-Хем

Fig. 2. Drainage model of Kara-Khem watershed

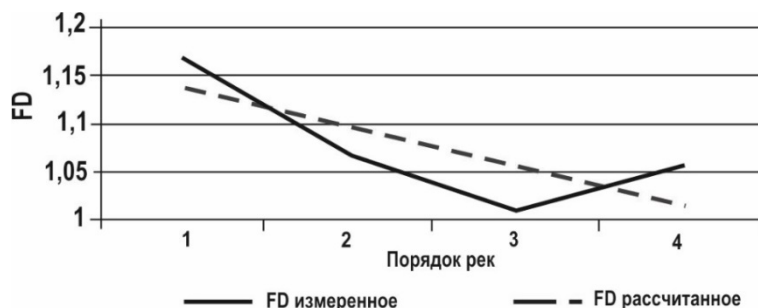


Рис. 3. Фрактальная модель дренажа р. Кара-Хем

Fig. 3. Fractal drainage model of Kara-Khem watershed

Таблица 2

Параметры водотоков рек 4-го порядка бассейна р. Оо-Хем

Table 2

Parameters of river stream 4 order river basin Oo-Chem

Параметр		Порядок рек (<i>i</i>)				Коэффициент (<i>R</i>)
		1	2	3	4	
р. Ойнаа						
Кол-во водотоков реки (<i>N_i</i>)	Измерено	27	4	2	1	<i>R_C</i> 5,68
	Вычислено	64,6	11,4	2,00	0,35	<i>I_n</i> 0,35
Суммарная длина водотоков, км (<i>L_i</i>)	Измерено	62,4	18,9	8,5	4,9	<i>R_L</i> 2,88
	Вычислено	70,88	24,55	8,5	2,94	
Средняя суммарная длина водотоков, км (<i>l_i</i>)	Измерено	2,23	2,78	4,22	4,9	<i>R_l</i> 0,8
	Вычислено	2,72	3,39	4,22	5,26	
р. Кара-Адыр						
Кол-во водотоков рек (<i>N_i</i>)	Измерено	56	8	3	1	<i>R_C</i> 6,19
	Вычислено	115,1	18,58	3,00	0,48	<i>I_n</i> 0,48

Параметр		Порядок рек (<i>i</i>)				Коэффициент (<i>R</i>)
		1	2	3	4	
Суммарная длина водотоков, км (<i>L_i</i>)	Измерено	106,9	23,9	22,9	11,04	<i>R_L</i> 3,33
	Вычислено	253,83	76,24	22,90	6,88	
Средняя суммарная длина водотоков, км (<i>l_i</i>)	Измерено	1,59	1,99	7,61	11,04	<i>R_I</i> 0,57
	Вычислено	2,49	4,35	7,61	13,28	
р. Шеннелиг						
Кол-во водотоков реки (<i>N_i</i>)	Измерено	28	7	2	1	<i>R_C</i> 3,77
	Вычислено	28,52	7,55	2,0	0,53	<i>I_n</i> 0,53
Суммарная длина водотоков, км (<i>L_i</i>)	Измерено	46,62	14,6	19,7	4,68	<i>R_L</i> 2,69
	Вычислено	143,42	53,17	19,71	7,3	
Средняя суммарная длина водотоков, км (<i>l_i</i>)	Измерено	1,46	1,83	6,57	4,68	<i>R_I</i> 0,9
	Вычислено	5,37	5,94	6,57	4,68	
р. Демержи						
Кол-во водотоков реки (<i>N_i</i>)	Измерено	56	15	3	1	<i>R_C</i> 3,95
	Вычислено	46,74	11,84	3,0	0,76	<i>I_n</i> 0,76
Суммарная длина водотоков, км (<i>L_i</i>)	Измерено	100,9	34,3	43,5	4,8	<i>R_L</i> 3,43
	Вычислено	512,4	149,3	43,5	12,67	
Средняя суммарная длина водотоков, км (<i>l_i</i>)	Измерено	1,8	1,8	8,7	4,8	<i>R_I</i> 1,09
	Вычислено	10,43	9,53	8,7	7,95	
р. Ак-Хем						
Кол-во водотоков реки (<i>N_i</i>)	Измерено	37	11	3	1	<i>R_C</i> 3,41
	Вычислено	34,8	10,22	3,0	0,88	<i>I_n</i> 0,88
Суммарная длина водотоков, км (<i>L_i</i>)	Измерено	58,58	38,66	22,23	8,14	<i>R_L</i> 1,78
	Вычислено	70,71	39,65	22,23	12,46	
Средняя суммарная длина водотоков, км (<i>l_i</i>)	Измерено	1,36	3,22	11,11	8,14	<i>R_I</i> 0,84
	Вычислено	7,99	9,42	11,11	13,1	

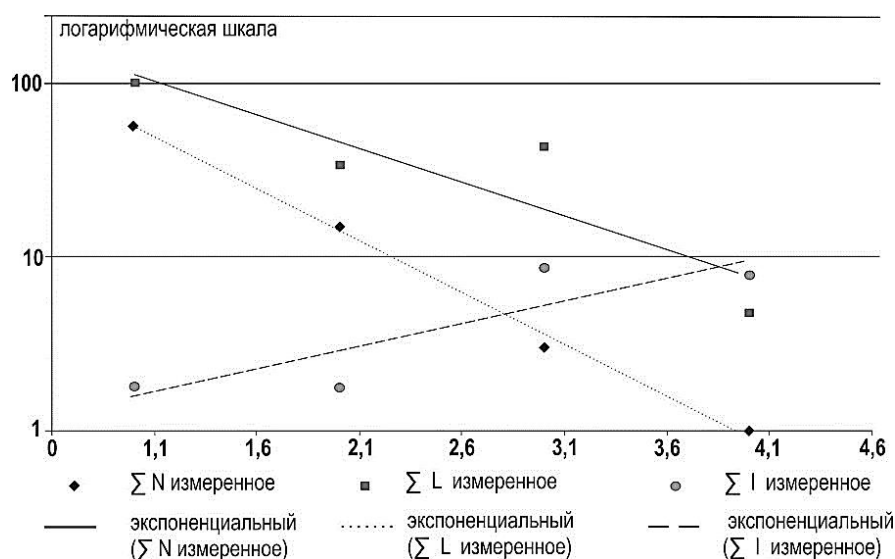


Рис. 4. Морфометрическая модель р. Демержи

Fig. 4. Drainage model of Demerzhi watershed

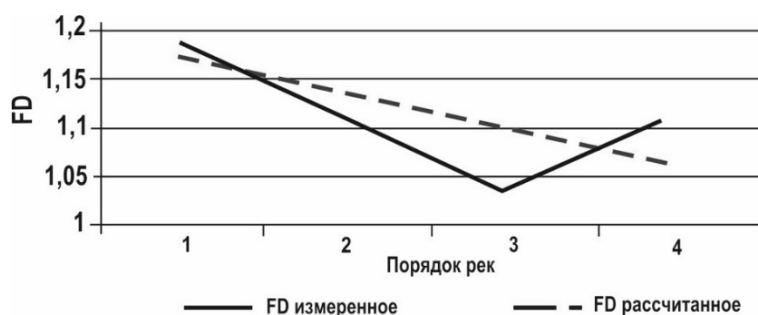


Рис. 5. Фрактальная модель дренажа р. Демержи

Fig. 5. Fractal drainage model of Demerzhi watershed

Таблица 3

Морфометрические характеристики

Table 3

Morphometric characteristics

Название реки	Средний коэффициент бифуркации (Rb)	Плотность дренажа (D), км/км ²
Бассейн Харала		
Шорлуг	3,87	0,99
Кара-Хем	4,1	0,83
Чайынды	3,16	0,72
Сай-Кежиг	3,87	1,17
Бассейн Оо-Хема		
Ойнаа	3,58	0,53
Кара-Адыр	4,22	0,75
Шеннелиг	3,17	0,75
Демержи	3,91	0,74
Ак-Хем	3,34	0,62

Согласно исследованиям А. Стралера [Strahler, 1957], коэффициент бифуркации показывает небольшой диапазон вариаций для разных регионов или для разных сред, за исключением тех случаев, когда доминирует мощный геологический контроль. Порядковая нерегулярность в Rb в основном обусловлена геологическими и литологическими особенностями водосборного бассейна. Чем ниже значение Rb , тем меньше структурных нарушений [Strahler, 1964]. Коэффициент бифуркации бассейнов рек исследуемой территории имеет наибольшее значение для потока 1-го и 2-го порядков, но уменьшается в потоке 3-го и 4-го порядков, поскольку на него не влияет какой-либо структурный контроль. Средний коэффициент бифуркации бассейнов рек изменяется от 3,16 до 4,22, что характерно для горных районов [Хортон, 1948].

Густота расчленения поверхности зависит как от климатических, так и от физических характеристик водосборного бассейна и непосредственно связана с величиной водного баланса. Возрастающая густота расчленения поверхности (плотность дренажа) сопровождается увеличением коэффициентов бифуркации. На рассматриваемой территории плотность дренажа варьируется от 0,53 до 1,17 км/км². Более низкую плотность дренажа имеют бассейны рек Ойнаа – 0,53 км/км² и Ак-Хем – 0,62 км/км², относящиеся к бассейну р. Оо-Хем. Для рек, составляющих бассейн Харала, плотность дренажа имеет более высокие значения (см. табл. 3). Высокая плотность дренажа для рек Сай-Кежиг – 1,17 км/км² и Кара-Хем – 0,99 км/км² бассейна р. Харал объясняется расположением их в пределах более влажной Серлигхемской котловины, в днище древнего Верхнехаральского приледникового озера, сложенного плохо проницаемыми озерными глинами, мощность которых, по данным бурения, превышает 10 м.

Заключение

Впервые представлен морфометрический и фрактальный анализ речных бассейнов р. Харал и р. Оо-

Хем Ойна-Харальского рудного узла на основе классификации Хортон–Стралера. В работе апробирована новая морфометрическая и фрактальная модель дренажа, позволяющая наблюдать качественные и количественные изменения в определении водосборного бассейна с учетом логарифмической шкалы числа, длины и средней длины речных водотоков разного порядка. Анализ индекса равновесия для бассейнов рек Харал и Оо-Хем указывает на то, что реки данного бассейна не находятся в равновесии, они имеют относительную степень недоразвития, кроме р. Чайынды, которая переразвита ($I_n = 1,4$). Это состояние дисбаланса подтверждается фрактальным анализом, свидетельствующим, что бассейны рек 4-го порядка имеют потоки порядка 4, с фрактальной размерностью выше потоков 3-го порядка.

Причина в том, что современная речная сеть р. Оо-Хем и р. Харал находится в молодой стадии развития, характерной для горных рек; здесь продолжается активная глубинная и боковая эрозия, продольные профили не выработаны. Это связано со сложной историей развития бассейнов, с многократным изменением базисов эрозии, вызванных оледенениями, с перестройкой речной сети и перехватом рек, произошедшим в верхнеплейстоценовое время в связи с таянием ледникового покрова. Река Чайынды до ее перехвата относилась к более древней и развитой речной системе Палео-Кара-Хема. Количественный анализ морфометрических параметров речных бассейнов может способствовать раскрытию климатических, геоморфологических, структурных и геологических особенностей территории. С теоретической точки зрения проведенные исследования вносят определенный вклад в развитие фрактальной методологии для дальнейшего накопления фактурного материала. В пределах Ойна-Харальского рудного узла апробация морфометрического и фрактального анализа речных бассейнов р. Харал и р. Оо-

Хем может служить для прогнозирования и выявления новых россыпных месторождений золота в элементах древней речной сети.

Работа выполнена по государственному заданию ТуВНКОПР СО РАН (проект № АААА-А17-117072710021-1), РФФИ (проект № 20-05-00605).

ЛИТЕРАТУРА

- Аюнова О.Д., Чупикова С.А., Прудников С.Г.** Фрактальный анализ разломно-блоковых морфоструктур Саяно-Тувинского нагорья // Процессы в геосредах. 2018. № 3 (16). С. 999–1003.
- Гросвальд М.Г.** Развитие рельефа Саяно-Тувинского нагорья. М. : Наука, 1965. 165 с.
- Калуш Ю.А., Логинов В.М., Чупикова С.А.** Фрактальная размерность речной сети. Программа для ЭВМ: Патент РФ № 2006611604; заявитель и правообладатель Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН. №2006610092; заяв. 10.01.2006; зарег. 12.05.2006.
- Мандельброт Б.** Фрактальная геометрия природы. М. : Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
- Ржаницын Н.А.** Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. М. : Гидрометеиздат, 1960. 238 с.
- Рудные формации Тувы** // Зайков В.В., Лебедев В.И., Тюлькин В.Г., Гречищева В.Н., Кужугет К.С. ; отв. ред. В.А. Кузнецов. Новосибирск : Наука. 1981. 202 с.
- Фрактальный анализ** в флювиальной геоморфологии / под ред. А.В. Иванова, А.В. Позднякова. М. : Университетская книга, 2013. 188 с.
- Хортон Р.Е.** Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. Гидрофизический подход к количественной морфологии / пер. с англ. М. ; Л. : Изд-во иностр. лит., 1948. 158 с.
- Чупикова С.А., Андронаке И.К.** Морфометрический и фрактальный анализ водосборного бассейна реки Харал // Природные ресурсы, среда и общество. 2019. № 2 (2). С. 54–60.
- Andronache I., Ahammer H., Jelinek H.F., Peptenatu D., Ciobotaru A.M., Draghici C.C., Pintili R.D., Simion A.G., Teodorescu C.** Fractal analysis for studying the evolution of forests // Chaos, Solitons & Fractals. 2016. № 91. P. 310–318.
- Andronache I., Marin M., Fischer R. et al.** Dynamics of Forest Fragmentation and Connectivity Using Particle and Fractal Analysis // Sci/ Rep. 2019. № 9. P. 12228. DOI: 10.1038/s41598-019-48277-z
- Grecu F., Palmentola G.** Dynamic geomorphology. Bucharest : Technical Publishing House, 2003. 392 p.
- Diaconu D.C., Andronache I., Ciobotaru A.M., Ahammer H., Zelenakova M., Dinescu R., Podnyakov A., Chupikova S.A.** Fractal drainage model – a new approach to determinate the complexity of watershed // Acta montanistica slovacica. Technicka Univerzita v Kosciciach. 2017. V. 22, № 1. P. 12–21.
- Diaconu D.C., Andronache I., Pintili R.-Da., Breţcan P., Simion A.G., Drăghici C.C., Gruia K.A., Grecu A., Marin M., Peptenatu D.** Using fractal fragmentation and compaction index in analysis of the deforestation process in Bucegi mountains group, Romania // Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences. 2019. V. 14, № 2. P. 431–438. DOI: 10.26471/cjees/2019/014/092
- Milton L.E.** The Geomorphic Irrelevance of Some Drainage Net Laws // Australian Geographical Studies. 1966. V. 4. P. 89–95.
- Strahler A.N.** Hypsometric (Area-Altitude) analysis of erosional topography // Geological Society of America Bulletin. 1952. V. 63 (11). P. 1117–1142.
- Strahler A.N.** Quantitative analysis of watershed geomorphology // Transactions of the American Geophysical Union. 1957. V. 38. B. 6. P. 913–920.
- Strahler A.N.** Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In Chow, V.T. (ed.) Handbook of Applied Hydrology. New York : McGraw-Hill, 1964. P. 439–476.

Авторы:

Чупикова Светлана Алексеевна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия.
E-mail: s_fom@inbox.ru

Прудников Сергей Григорьевич, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, ФГБУН Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия.
E-mail: prudnikov_s@inbox.ru

Андронаке Ион Кристевич, кандидат географических наук, научный сотрудник, Исследовательский центр по комплексному анализу и территориального управления, географический факультет, Бухарестский университет, Бухарест, Румыния.
E-mail: andronacheion@email.su

Geosphere Research, 2020, 2, 90–100. DOI: 10.17223/25421379/15/8

S.A. Chupikova¹, S.G. Prudnikov¹, I.K. Andronache²

¹ *Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of SB RAS, Kyzyl, Russia*

² *University of Bucharest, Bucharest, Romania*

MORPHOMETRIC FEATURES OF THE STRUCTURE OF RIVER BASINS OINA-KHARAL ORE NODE (TUVA)

The article presents a morphometric and fractal analysis of the river basins of the Kharal river and the OO-Khem river of the Oina-Haral ore node based on the Horton-Straler classification using geographical information system (GIS) methods. The analysis was performed on maps digitized at a scale of 1: 100 000. The morphometric characteristics under study, such as the number, orders of watercourses, and their length, were directly calculated in the ArcGIS program. The fractal dimension indicator was calculated using the software "Fractal dimension of the river network". A morphometric and fractal model of the catchment area has been tested. Morphometric analysis is performed by measuring linear parameters and allows us to observe qualitative and quantitative changes in the definition of the catchment area, taking into account the logarithmic scale of the number, length and average length of river watercourses of different orders. The advantage of the fractal model is that it requires only the values of the fractal dimension of river streams of different orders. The obtained morphometric and fractal models of rivers Kara-Khem, Chayyndy, Ak-Khem and Demerzhi reflect their im-

plementation, and in the catchments of the rivers Shorlug, Sai-Kezhig, Oinaa, Kara-Adyr, Shennelig should be more river sections 2 and 3-th order. Analysis of the equilibrium index for the Kharal and Oo-Khem river basins indicates that the rivers of this basin are not in equilibrium, they have a relative degree of underdevelopment, except for the Chayynda river, which is over-developed ($ln = 1.4$). The state of the imbalance is confirmed by fractal analysis, which indicates that river basins of the 4th order have watercourses of order 4, with a fractal dimension higher than those of the 3rd order. The reason is that the modern river network of the Oo-Khem river and the Kharal river is at a young stage of development, characteristic of mountain rivers; active deep and lateral erosion continues here, the longitudinal profiles are not developed. This is due to the complex history of basin development, with multiple changes in the bases of erosion caused by glaciation, with the restructuring of the river network and interception of rivers that occurred in the upper Pleistocene period due to the melting of the ice cover. The bifurcation coefficient of the river basins of the study area has the highest value for the flow of the 1st and 2nd orders, but decreases in the flow of the 3rd and 4th orders, since it is not affected by any structural control. The quantitative analysis of morphometric parameters can help to reveal the climatic, geomorphological, structural and geological features of the territory. From a theoretical point of view, this research makes a certain contribution to the development of fractal methodology for further accumulation of texture material. Within the Oina-Kharalsky ore node, testing of morphometric and fractal analysis of the river basins of the Kharal river and the Oo-Khem river can be used to predict and identify new placer gold deposits in the elements of the ancient river network.

Keywords: morphometric characteristics, drainage model, drainage basin, river order, Tuva.

References

- Ayunova O.D., Chupikova S.A., Prudnikov S.G. *Fraktal'nyy analiz razlomno-blokovykh morfostruktur Sayano-Tuvinskogo nagor'ya* [Fractal analysis of fault-block morphostructures of the Sayano-Tuvinian highlands] // Processes in geomedia. 2018. № 3 (16). pp. 999–1003. In Russian
- Grosval'd M.G. *Razvitiye rel'efa Sayano-Tuvinskogo nagor'ya* [The development of the relief of the Sayan-Tuva highlands]. Moscow: Nauka. 1965. 165 p. In Russian
- Kalush Yu.A., Loginov V.M., Chupikova S.A. *Fraktal'naya razmernost' rechnoy seti* [Fractal dimension of the river network]. Computer Program: RF Patent No. 2006611604; Applicant and copyright holder Tuva Institute for the Integrated Development of Natural Resources SB RAS. No. 20066610092; application 01/10/2006; registered. 05/12/2006. In Russian
- Mandelbrot B. *Fraktal'naya geometriya prirody* [Fractal geometry of nature]. Moscow: Institute for Computer Research. 2002. 656 p. in Russian
- Rzhanitsyn N.A. *Morfologicheskie i gidrologicheskie zakonomernosti stroeniya rechnoy seti* [Morphological and hydrological patterns of the structure of the river network]. Moscow: Gidrometeoizdat, 1960. 238 p. In Russian
- Rudnye formatsii Tuvy* [Tuva ore formations] // Zaikov V.V., Lebedev V.I., Tyul'kin V.G., Grechishcheva V.N., Kuzhuget K.S.; otv. red. akad. V.A. Kuznetsov. Novosibirsk: Nauka. 1981. 202 p. In Russian
- Fraktal'nyy analiz v flyuvial'noy geomorfologii* [Fractal analysis in fluvial geomorphology] // Edited by A.V. Ivanov, A.V. Pozdnyakov. Moscow: Publishers "University Book", 2013. 188 p. In Russian
- Horton R. E. *Eroziionnoe razvitiye rek i vodosbornykh bassejnov. Gidrofizicheskij podhod k kolichestvennoj morfologii* [Erosive development of rivers and watersheds. Hydrophysical approach to quantitative morphology] / Moscow-Leningrad: Izd-vo inostr. lit., 1948. p.158. In Russian
- Chupikova S.A., Andronake I.K. *Morfometricheskij i fraktal'nyy analiz vodosbornogo bassejna reki Kharal* [Morphometric and fractal analysis of the Kharal river drainage basin] // Prirodnye resursy, sreda i obshchestvo. 2019. № 2 (2). pp. 54–60. In Russian
- Andronache I., Ahammer H., Jelinek H.F., Peptenatu D., Ciobotaru A.M., Draghici C.C., Pintilii R.D., Simion A.G., Teodorescu C. Fractal analysis for studying the evolution of forests. *Chaos, Solitons & Fractals*. 91. 2016. pp. 310–318.
- Andronache, I., Marin, M., Fischer, R. et al. Dynamics of Forest Fragmentation and Connectivity Using Particle and Fractal Analysis. *Sci. Rep* 9, 12228 (2019). DOI: 10.1038/s41598-019-48277-z
- Grecu F., Palmentola G. *Dynamic geomorphology*. Technical Publishing House, Bucharest, 2003. 392 p.
- Diaconu D.C., Andronache I., Ciobotaru A.M., Ahammer H., Zelenakova M., Dinescu R., Podnyakov A., Chupikova S.A. Fractal drainage model – a new approach to determinate the complexity of watershed // *Acta montanistica slovacica*. Technicka Univerzita v Kosiciach. 2017. V. 22, № 1. pp. 12–21.
- Diaconu D.C., Andronache I., Pintilii R.-Da., Breţcan P., Simion A.G., Drăghici C.C., Gruia K.A., Grecu A., Marin M., Peptenatu D. Using fractal fragmentation and compaction index in analysis of the deforestation process in Bucegi mountains group, Romania. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*. 2019. 14 (2): pp. 431–438. DOI: 10.26471/cjees/2019/014/092
- Milton L.E. The Geomorphic Irrelevance of Some Drainage Net Laws, *Australian Geographical Studies* 1966. V.4. pp. 89–95.
- Strahler A.N.: *Hypsometric (Area-Altitude) analysis of erosional topography*, Geological Society of America Bulletin, 1952. 63 (11). pp. 1117–1142.
- Strahler A.N. Quantitative analysis of watershed geomorphology // *Transactions of the American Geophysical Union*. 1957. V. 38. B. 6. pp. 913–920.
- Strahler A.N. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In Chow, V.T. (ed.) *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York, 1964. pp. 439–476.

Authors:

Chupikova Svetlana AL., Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher, Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources, SB of the RAS, Kyzyl, Russia.

E-mail: s_fom@inbox.ru

Prudnikov Seirgei Gr., Cand. Sci.(Geol.-Miner.), Head of laboratory, Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources, SB of the RAS, Kyzyl, Russia.

E-mail: prudnikov_s@inbox.ru

Andronache Ion, Cand. Sci. (Geogr.), Associate Researcher, Research Centre for Integrated Analysis and Territorial Management, University of Bucharest, Bucharest, Romania

E-mail: andronacheion@email.su