



MORPHOMETRIC ANALYSIS OF GEOMORPHOLOGICAL FORMATIONS OF THE ALTAI-SAYAN MOUNTAIN REGION AND ADJACENT AREAS OF CENTRAL ASIA

V.N. Dobretsov  , I.S. Novikov , I.D. Zolnikov , N.N. Dobretsov

Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

ABSTRACT. This work presents an analysis of morphometric parameters for low-mountain, mid-mountain, and high-mountain geomorphological formations of the Great Altai, Western Sayan, and Eastern Sayan. The geomorphological formations of the mountain belt are associated with neotectonic blocks that experienced the Late Cenozoic uplift. Analysis has been made of the morphometric parameters such as absolute elevations, depth and density of dissection, average slope angles, and the degree of preservation of the planation surface (peneplain) formed within the study area prior to the onset of neotectonic activation. The characterization has been performed of criteria for morphometric differentiation between geomorphological formations of the mountain belt. It has been found that the density of dissection does not differ between the different types of formations, whereas all other parameters show a significant difference. The identified similarity in horizontal dissection across different formations suggests that the initiation of the hydrographic network was the early orogenic stages, after which it had continued to develop inheritedly.

KEYWORDS: Altai-Sayan Mountains; morphometric relief parameters; geomorphological formations; neotectonics; geoinformation technologies

FUNDING: The study was carried out on the state assignment of the Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (projects No. FWZN-2026-0004, FWZN-2026-0011).



EDN: QCKBML

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Vladimir N. Dobretsov, vndobretsov@igm.nsc.ru

Received: October 26, 2025

Revised: February 12, 2026

Accepted: February 13, 2026

FOR CITATION: Dobretsov V.N., Novikov I.S., Zolnikov I.D., Dobretsov N.N., 2026. Morphometric Analysis of Geomorphological Formations of the Altai-Sayan Mountain Region and Adjacent Areas of Central Asia. *Geodynamics & Tectonophysics* 17 (2), 0887. doi:10.5800/GT-2026-17-2-0887

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ФОРМАЦИЙ АЛТАЕ-САЯНСКОЙ ГОРНОЙ ОБЛАСТИ И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

В.Н. Добрецов, И.С. Новиков, И.Д. Зольников, Н.Н. Добрецов

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

АННОТАЦИЯ. Работа посвящена анализу морфометрических показателей низкогорной, среднегорной и высокогорной геоморфологических формаций Большого Алтая, Западного и Восточного Саяна. Геоморфологические формации горного ряда связаны с неотектоническими блоками, испытавшими воздымание в позднем кайнозое. Проанализированы следующие морфометрические показатели: абсолютная высота, глубина и густота расчленения, средние углы наклона склонов, степень сохранности поверхности выравнивания (пенеплена), развитой в пределах рассматриваемой территории до начала неотектонической активизации. Охарактеризованы критерии различия геоморфологических формаций горного ряда по морфометрическим показателям. Установлено, что густота расчленения не различается между разными типами формаций, а остальные показатели существенно разнятся. Выявленное сходство горизонтальной расчлененности у разных формаций свидетельствует о том, что гидросеть закладывается на ранних этапах горообразования и далее развивается унаследованно.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Алтае-Саянская горная область; морфометрические показатели рельефа; геоморфологические формации; неотектоника; геоинформационные технологии

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проведено в рамках госзадания ИГМ СО РАН (проекты № FWZN-2026-0004, FWZN-2026-0011).

1. ВВЕДЕНИЕ

В отечественной геологии формационный подход возник и получил широкое развитие в 1960-е годы в связи с потребностью анализа значительных по площади и генетически связанных структурно-вещественных комплексов [Kuznetsov, 1964; Shatsky, 1965]. Геоморфология также нуждалась в инструменте выявления глобальных закономерностей в строении рельефа. Формационный анализ впервые предложил использовать Н.А. Флоренсов [Florensov, 1971]. В настоящее время формационный подход в геоморфологии переживает второе рождение, поскольку он оказался востребован при проведении крупных обобщений геоморфологических данных с применением современных геоинформационных технологий. В отличие от традиционных методов морфометрического анализа, доминировавших в конце XX в., современные подходы базируются на высокодетальных цифровых моделях рельефа (ЦМР) и алгоритмах автоматизированного распознавания образов. Ключевое развитие получили методы объектно-ориентированного анализа (OBIA) [Drăguț, Eisank, 2012] и концепция геоморфонов [Jasiewicz, Stepiński, 2013], которые позволяют формализовать выделение геоморфологических единиц. В данной работе формационный подход Н.А. Флоренсова интегрируется с современными методами цифрового анализа рельефа, что соответствует мировым трендам перехода от описательной морфометрии к генетической интерпретации форм [Xiong et al., 2021; Minár et al., 2020].

Алтае-Саянская горная область представляет собой крупный сегмент Центрально-Азиатского горного пояса, образуя звено между горами Тянь-Шаня и Забай-

каля. Были выделены геоморфологические формации блоковых высокогорий, среднегорий, низкогорий и межгорных впадин [Novikov, 2024]. Они представляют собой парагенез элементарных поверхностей рельефа в сочетании с характерным для них аккумулярованным или денудированным субстратом, т.е. выделены по комплексу морфохроногенетических показателей, что полностью соответствует представлениям Н.А. Флоренсова о геоморфологических формациях как о территориях с характерным рельефом на определенном субстрате.

2. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРЕДШЕСТВЕННИКОВ

Традиционно в геоморфологии выделяют высочайшие, высокие, средние и низкие горы. Смысловое содержание этих понятий двойственно. С одной стороны, разновидности горного рельефа рассматриваются как морфологические, характеризующиеся различным набором форм рельефа, лишь ограниченно зависящим от их высотного расположения. С другой стороны, разновидности горного рельефа воспринимаются как разные ступени гор, поднятие которых зависит от интенсивности неотектонических движений. При этом абсолютная высота является производной от амплитуды неотектонического поднятия, так как доорогенный этап характеризовался выровненным исходным рельефом. В первом случае морфологические типы гор различаются по глубине расчленения, крутизне и скалистости склонов, наличию или отсутствию ледниковых форм. Во втором случае ключевым критерием выделения является абсолютная высота. Иногда вообще

деление гор на низкие, средние, высокие и высочайшие приобретает субъективный характер и в каждом конкретном регионе выделяются все ярусы горного рельефа вне зависимости от их абсолютной высоты и морфологии.

З.А. Сваричевская [Svarichevskaya, 1961] разделяла горы по шкале, единой для всей суши. Она исходила из разделения областей горообразования по степени интенсивности проявления новейших движений (слабое, умеренное, интенсивное и весьма интенсивное) [Shults, 1948]. При этом каждая из них характеризуется своим градиентом поднятия. По ее представлениям целые горные страны могут принадлежать к какой-либо одной области горообразования (Урал – слабое; горы северо-востока – умеренное; Большой Кавказ – интенсивное; Памир – весьма интенсивное). Исходя из этих представлений, она выделяла горы высочайшие (>5000 м), высокие (5000–3000 м), средние (3000–2000 м), низкие (2000–1000 м); холмогорья высокие (1000–600 м), средние (600–300 м), низкие (300 м).

Рассматриваемые нами геоморфологические формации в основном относятся к одной горной области – Алтае-Саянской, созданной новейшими блоковыми движениями. Рассматриваемые части горных сооружений прилегающих территорий также имеют блоковую природу, в силу этого их морфометрические характеристики сравнимы между собой. Геоморфологические формации выделены нами по морфологическому принципу и относятся к нижнему, среднему и верхнему этажу горного рельефа одной горной области с прилегающими территориями (рис. 1), поэтому применение к ним определений «низкогорье», «среднегорье» и «высокогорье» носит относительный характер и используется для краткости, чтобы не называть геоморфологические формации через перечисление основных составляющих их генетически однородных поверхностей. Следует отметить, что выделенные формации горного ряда относятся к блоковому типу гор. Такие горы формируются в пределах мобильных зон на месте денудационной равнины после длительного периода тектонического покоя. Их морфология существенно отличается от складчатых горных сооружений, формирующихся на месте инверсированных осадочных бассейнов (Большой Кавказ и др.), и точнее было бы называть выделенные нами формации «глыбовые низкогорья» и т.д.

Формация низкогорья образовалась при небольших вертикальных неотектонических поднятиях блоков палеозойских, а в восточной части Алтае-Саянской горной области и протерозойских пород. Низкогорья расположены на севере и западе Горного и Рудного Алтая, образуют западное обрамление Кузнецкого Алатау и Горной Шории и западное окончание Восточного Саяна. Они также располагаются среди равнин и плато Западной и Восточной Сибири, формируя низкогорные Салаирский и Енисейский кряжи. Отдельные блоки с низкогорным рельефом имеют обычно изометричную или слегка вытянутую в плане форму. Водо-

разделы представлены обширными фрагментами поверхности выравнивания. Долины геоморфологической формации низкогорья носят чисто водно-эрозионный характер. Следы оледенения полностью отсутствуют. Характер аллювия перстративный, что на фоне присутствия рассеянного золотого оруденения в слагающих низкогорья породах привело к формированию крупной россыпной золотоносной провинции.

Формация среднегорья образовалась в ходе среднеамплитудных вертикальных неотектонических поднятий блоков палеозойских, а в восточной части и протерозойских пород. Формация среднегорья обычно занимает структурную позицию в плане между высокогорьем и низкогорьем или между высокогорьем и плато Восточной Сибири или крупных межгорных котловин Алтае-Саянской горной области. Среднегорные сооружения образуют северо-западную и северо-восточную часть Восточного Саяна, восточную часть Кузнецкого Алатау и Горной Шории, северную и южную часть Западного Саяна, северную часть Горного Алтая, восточную часть Рудного Алтая, а на прилегающих территориях – западные блоки Селингинского нагорья и северные предгорья Хангая. Неотектонические блоки со среднегорным рельефом имеют обычно вытянутую в плане форму. Водоразделы образованы сохранившимися фрагментами поверхности выравнивания. Долины в пределах данной геоморфологической формации среднегорья носят в основном водно-эрозионный характер. Следы оледенения имеются только в верховьях долин в приводораздельных частях. Характер аллювия инстративный.

Формация высокогорья развита в пределах неотектонических блоков, испытавших наибольшее воздымание. Неотектонические блоки с высокогорным рельефом всегда имеют вытянутую форму. Формация высокогорья развита на небольшом участке в центральной части Кузнецкого Алатау, в осевых частях Горного и Монгольского Алтая, в северо-восточной части Горного Алтая, в осевых частях Западного и Восточного Саяна, в хребтах Академика Обручева и Танну-Ола, в западной части Селенгинского нагорья. Уплощенная вершинная поверхность горных сооружений Центральной Азии и Алтае-Саянской области, в частности, включает несколько разновозрастных уровней в диапазоне поздний мел – ранний неоген. Уровни формировались в достаточно узком высотном диапазоне, что в масштабе проводимого исследования позволяет рассматривать ее как единую поверхность выравнивания – реликт доорогенного рельефа. Поверхность выравнивания в осевых частях высокогорных хребтов сохраняется только в виде небольших фрагментов. Обычно она уничтожена ледниковыми процессами с образованием характерного гребневидного альпийского рельефа. На периферических ступенях хребтов поверхность выравнивания сохранена лучше и образует уплощенные водоразделы между ледниковыми долинами. Абсолютные высоты высокогорных хребтов существенно изменчивы с севера на юг и с запада

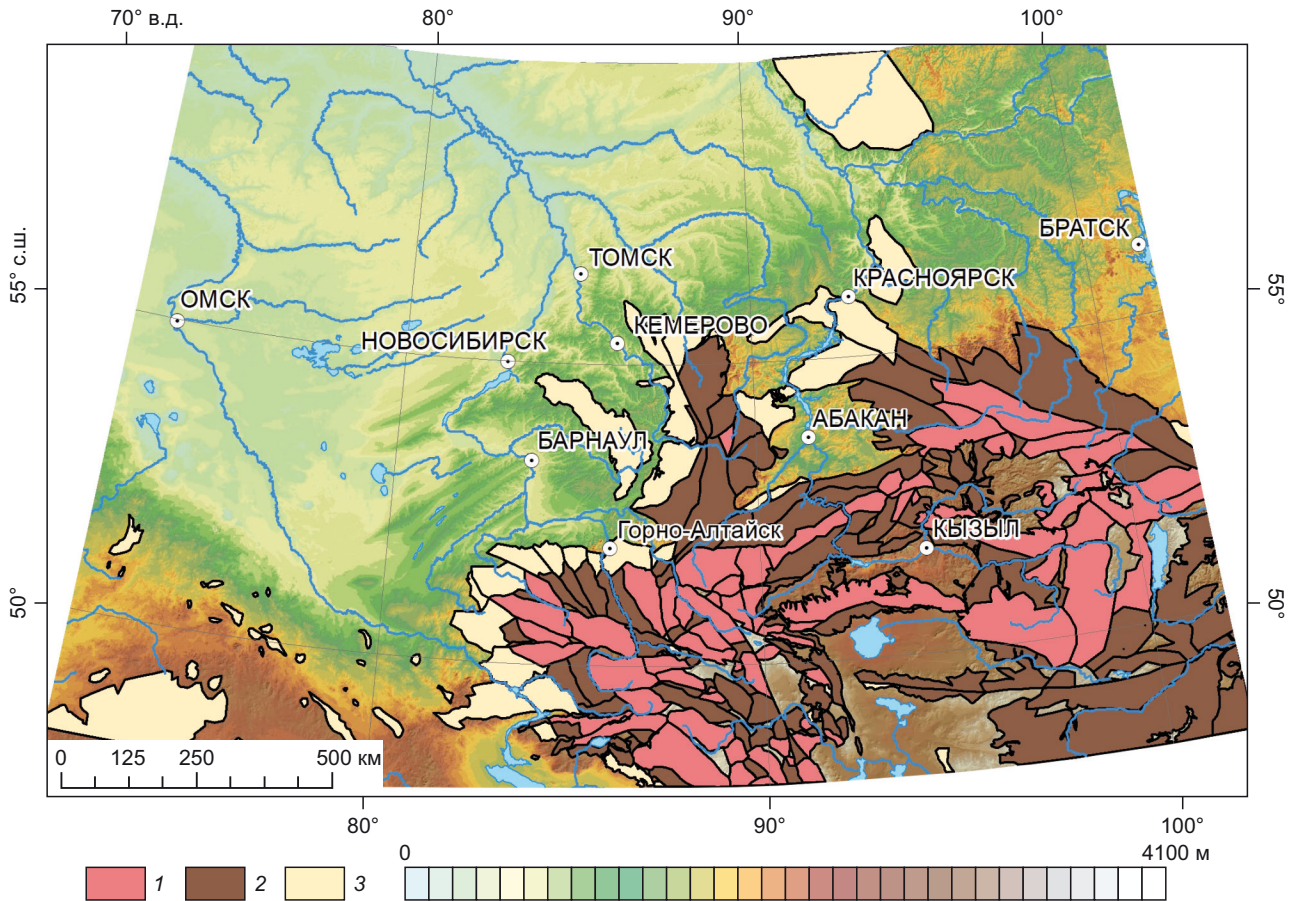


Рис. 1. Обзорная схема расположения формаций, для которых производился анализ морфометрических показателей. Геоморфологические формации (первый показатель – среднее значение, в скобках – разброс от минимума к максимуму): 1 – высокогорья (2031 (1463–2714 м)), 2 – среднегорья (1422 (602–2603 м)), 3 – низкогорья (620 (361–1053 м)).

Fig. 1. Location map of the formations for which the morphometric analysis has been performed. Geomorphological formations (the first indicator is the mean value, the parentheses enclose a range of the minimum to maximum values): 1 – high-mountain zone (2031 (1463–2714 m)), 2 – mid-mountain zone (1422 (602–2603 m)), 3 – low-mountain zone (620 (361–1053 m)).

на восток. Отличительными признаками геоморфологической формации высокогорья являются практически полное уничтожение поверхности выравнивания на водоразделах при сохранности сравнительно больших участков на низких ступенях хребтов по периферии и присутствие следов древних оледенений на всем протяжении долин. Если к высокогорным хребтам примыкают межгорные впадины, то на выходах из долин обычно расположены аккумулятивные моренные равнины, в отдельных случаях сливающиеся в сплошной моренный пояс по периферии впадин.

Предшественниками, выделявшими высокогорье, низкогорье и среднегорье на территории СССР, не были сформулированы в морфометрическом аспекте критерии их разделения [Geomorphological Map..., 1967]. Выделение этих объектов производилось на качественном уровне по формальным признакам, и основным критерием считалась абсолютная высота.

3. МЕТОДИКА

В основе исследования лежит интеграция геоморфологического картографирования методом выделе-

ния генетически однородных поверхностей [Novikov, 2024] с современными возможностями анализа цифрового рельефа, в качестве которого была использована цифровая модель поверхности Copernicus DSM [ESA, 2024]. Исходные данные получены в виде фрагментов размером 1×1° в системе координат WGS-1984, размер пикселя – 1 угловая секунда, что примерно соответствует 30 м. Для Алтае-Саянской горной области была создана мозаика в границах 47–59° с.ш. и 72–102° в.д., объединяющая 360 фрагментов. Для устранения артефактов на стыках фрагментов и приведения к единой проекции использована процедура гладкой триангуляции (Quintic Triangulation) с последующей трансформацией в проекцию Transverse Mercator. Специфика обработки была связана с изменением формы пикселя ЦМР Copernicus DSM севернее 50° с.ш., что потребовало создания и последующего удаления буферных зон для бесшовного слияния данных. Для выделения объектов анализа использована авторская экспертная классификация геоморфологических формаций Алтае-Саянской области [Novikov, 2024] в векторном формате. Из нее были выбраны полигоны, соответствующие

формациям низкогорья, среднегорья и высокогорья площадью более 2500 км², что исключило мелкие и нерепрезентативные участки. Итоговый набор данных составил 24 выдела низкогорья, 38 – среднегорья и 31 – высокогорья.

Расчет морфометрических показателей осуществлялся следующим образом. Для каждого выделенного полигона (формации) в средах ArcGIS и QGIS был рассчитан стандартный набор морфометрических показателей, характеризующих как плановую, так и высотную структуру рельефа (табл. 1). Расчеты выполнялись на основе подготовленной ЦМР с использованием стандартных и специализированных инструментов, в процессе подготовки данных были написаны скрипты на языке ArcPy для автоматизации процесса.

Абсолютная высота определялась как средняя высота поверхности выдела над уровнем моря в метрах. Она рассчитывалась путем статистического анализа значений ЦМР в пределах каждого полигона. Угол падения склона рассчитывался как средняя крутизна склонов в пределах каждого выдела. Для получения использовалась производная от ЦМР с применением стандартного инструмента Slope. Сохранность поверхности выравнивания (пенеплена) выражалась в процентах как доля площади выдела, соответствующая двум критериям: а) углы наклона поверхности $\leq 8^\circ$; б) положительные значения в матрице вертикальной расчлененности (что соответствует водораздельным поверхностям, а не долинам). Итоговая маска формировалась путем наложения этих двух условий. Вертикальная расчлененность оценивалась как средняя глубина вреза долин (амплитуда рельефа) в метрах. Она рассчитывалась как разность между исходной ЦМР и генерализованной моделью поверхности (ГМП). ГМП получали путем усреднения высот в скользящем круглом окне диаметром 10000 м. Горизонтальная расчлененность определялась как густота эрозионной сети, выраженная отношением суммарной длины водотоков к площади выдела (км/км²). Расчет выполнялся по стандартной методике в ArcGIS [Tarboton et al., 1991]. Плотность ребер рельефа рассчитывалась как густота водораздельных линий (ребер) в км/км². Методика основывалась на анализе углов между плоскостями смеж-

ных склонов, полученных из растра Slope по Aspect. Линии, где угол между склонами составлял $\geq 70^\circ$, интерпретировались как ребра рельефа и учитывались в расчете плотности. Тальвеги речных долин также являются ребрами рельефа, они были удалены из расчета, чтобы оставить только водораздельные линии. Плотность ребер является в значительной степени аналогом горизонтальной расчлененности.

Для всех выделов и каждого рассчитанного показателя была определена базовая статистика: минимум, максимум, среднее арифметическое (табл. 1). Полученные данные сведены в сводную таблицу. Для наглядного сравнения формаций построены гистограммы распределения и диаграммы средних значений. От использования методов оконной статистики для анализа плотности распределения признаков было решено отказаться ввиду чрезмерного усложнения моделей без существенного прироста интерпретационной ценности.

Выбранный набор из наиболее популярных морфометрических параметров позволяет комплексно охарактеризовать стадию развития горного рельефа. Абсолютная высота и вертикальная расчлененность отражают амплитуду неотектонических движений, угол наклона – интенсивность склоновых процессов, сохранность пенеплена – степень разрушения древнего выровненного рельефа, а показатели горизонтальной расчлененности и плотности ребер – унаследованную плановую структуру эрозионной сети.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного морфометрического анализа для низкогорья, среднегорья и высокогорья Алтае-Саянской области были получены количественные оценки ключевых показателей рельефа. Их средние, минимальные и максимальные значения представлены в табл. 1. Значимые различия обнаружены по четырем признакам (абсолютная высота, угол падения склона, степень сохранности пенеплена и вертикальная расчлененность) (рис. 2). Для корректного отображения их совместной динамики на одной оси показатели были масштабированы по максимальным значениям. Эти параметры четко дифференцируют

Таблица 1. Морфометрические признаки формаций

Table 1. Morphometric features of the formations

	I	II	III	IV	V	VI
Высокогорье	2031 (1463–2714)	19 (12–25)	7 (3–14)	724 (472–1148)	0.35 (0.17–0.56)	1.66 (1.17–2.73)
Среднегорье	1422 (602–2603)	14 (7–23)	9 (2–18)	520 (215–1050)	0.35 (0.16–0.57)	1.52 (0.73–2.36)
Низкогорье	620 (361–1053)	10 (4–16)	19 (4–39)	284 (88–453)	0.35 (0.12–0.69)	1.56 (0.60–2.53)

Примечание. Морфометрические признаки формаций: I – абсолютная высота, м; II – угол падения склона, °; III – сохранность пенеплена, %; IV – вертикальная расчлененность, м; V – горизонтальная расчлененность, пог. км/км²; VI – плотность ребер, пог. км/км². Первый показатель – среднее значение, в скобках – разброс от минимума к максимуму.

Note. Morphometric features of the formations: I – absolute elevation, m; II – slope angle, °; III – peneplain preservation, %; IV – vertical dissection, m; V – horizontal dissection, linear km/km²; VI – edge density, linear km/km². The first indicator is the mean value, the parentheses enclose a range of the minimum to maximum values.

низкогорные, среднегорные и высокогорные формации и могут рассматриваться как их диагностические признаки.

Абсолютная высота водоразделов демонстрирует ожидаемую иерархию: низкогорье (среднее ~620 м), среднегорье (~1422 м) и высокогорье (~2031 м). Диапазоны высот образуют перекрытия значений между формациями. Между минимальным значением высоты высокогорья и максимальным низкогорья существует разрыв, в то время как среднегорье занимает промежуточное положение с размытыми границами. Это однозначно указывает на блоковую природу четвертичного этапа новейшей орогении, в ходе которой территория Алтае-Саянской горной области была разбита новейшими разломами на отдельные блоки, испытавшие воздымание с разной амплитудой. Средние углы горных склонов последовательно возрастают от низкогорья к среднегорью и высокогорью, что отражает смену ведущего процесса расчленения при переходе от одной формации к другой. В низкогорьях продольный профиль долин близок к равновесному, врезание прекратилось и борта долин выполаживаются комплексом склоновых процессов. В среднегорьях долины преобразованы ледниками частично, а в высокогорье полностью, что повышает средние углы наклона бортов. Вертикальная расчлененность является наиболее чувствительным индикатором стадии развития гор. Ее средние значения составляют ~284 м для низкогорья, ~520 м для среднегорья и ~724 м для высокогорья. Это свидетельствует об увеличении высотных отметок и глубины врезания долин в зависимости от интенсивности неотектонических поднятий. Сохранность на водоразделах фрагментов доорогенной денудационной равнины (поверхности выравни-

вания/пенеплена) закономерно уменьшается от низкогорья (19.1 %) к среднегорью (9.3 %), высокогорью (7.0 %), что связано с постепенным разрушением древних выровненных поверхностей по мере углубления долин и отступления их склонов.

Как видно из табл. 1, при существенном различии средних значений для геоморфологических формаций по перечисленным выше морфометрическим показателям наблюдается перекрытие минимальных и максимальных значений для смежных формаций. Это обусловлено тем, что изначальная экспертная классификация геоморфологических формаций региона (см. рис. 1) проводилась в ходе обобщения для большой территории и ряд выделов был генерализован. При этом местами в крупные выделы одних формаций были включены мелкие полигоны, вероятно относящиеся к другому типу. Это привело к «размыванию» границ морфометрических показателей. Тем не менее, если сравнивать морфометрические показатели попарно (рис. 3), то видно, что их взаимное пересечение на границах разных геоморфологических формаций крайне невелико.

Полученные данные подтверждают, что среднегорная формация в морфометрическом отношении занимает промежуточное положение между низкогорной и высокогорной формацией по ряду параметров. В частности, она статистически обособлена по абсолютным высотам, углам наклона и вертикальной расчлененности. Однако по степени сохранности пенеплена среднегорная формация перекрывается с соседними типами. Это указывает на то, что среднегорье представляет собой формацию переходного типа, где сочетаются черты как унаследованного (сохраненные фрагменты пенеплена), так и интенсивно переработанного

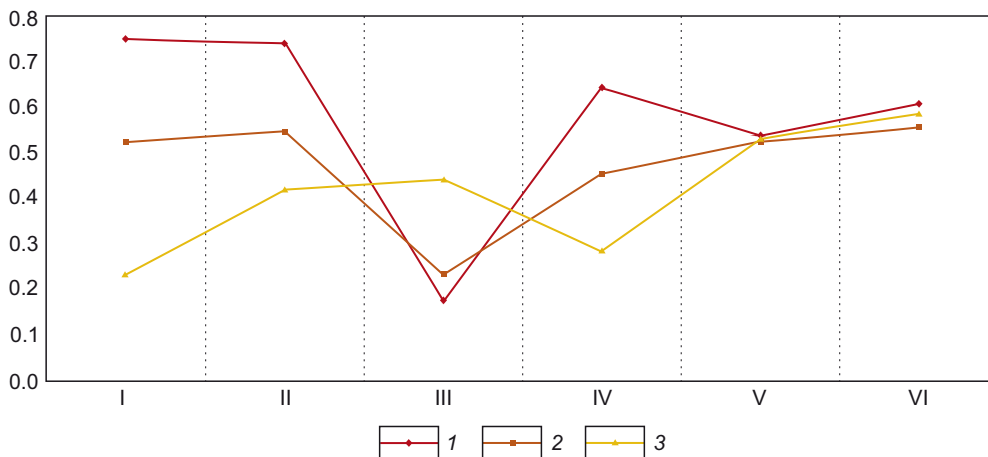


Рис. 2. Средние значения морфометрических показателей геоморфологических формаций горного ряда. Римскими цифрами внизу даны морфометрические показатели: I – абсолютная высота, м; II – угол падения склона, °; III – сохранность пенеплена, %; IV – вертикальная расчлененность, м; V – горизонтальная расчлененность, пог. км/км²; VI – плотность ребер, пог. км/км². 1 – высокогорья; 2 – среднегорья; 3 – низкогорья.

Fig. 2. Average values of morphometric indicators for geomorphological formations of the mountain belt. Roman numerals at the bottom denote morphometric indicators: I – absolute elevation, m; II – slope angle, °; III – penepain preservation, %; IV – vertical dissection, m; V – horizontal dissection, linear km/km²; VI – edge density, linear km/km². 1 – high-mountain zone; 2 – mid-mountain zone; 3 – low-mountain zone.

рельефа (значительная глубина расчленения). Кроме того, пересечение части морфометрических показателей среднегорной формации связано с особенностью строения высокогорных хребтов рассматриваемой территории. В отдельных случаях они развиваются по механизму телескопических горстов, когда в их пределах имеется ряд периферических блоков меньшего поряд-

ка, отстающих в воздымании с глубиной расчленения и сохранностью пенеплена, характерными для среднегорий. Они в силу сравнительно небольших размеров включаются в формации высокогорий, и, поскольку при картографировании геоморфологических формаций принято использовать принцип «один хребет – одна формация», их присутствие в составе высокогорной

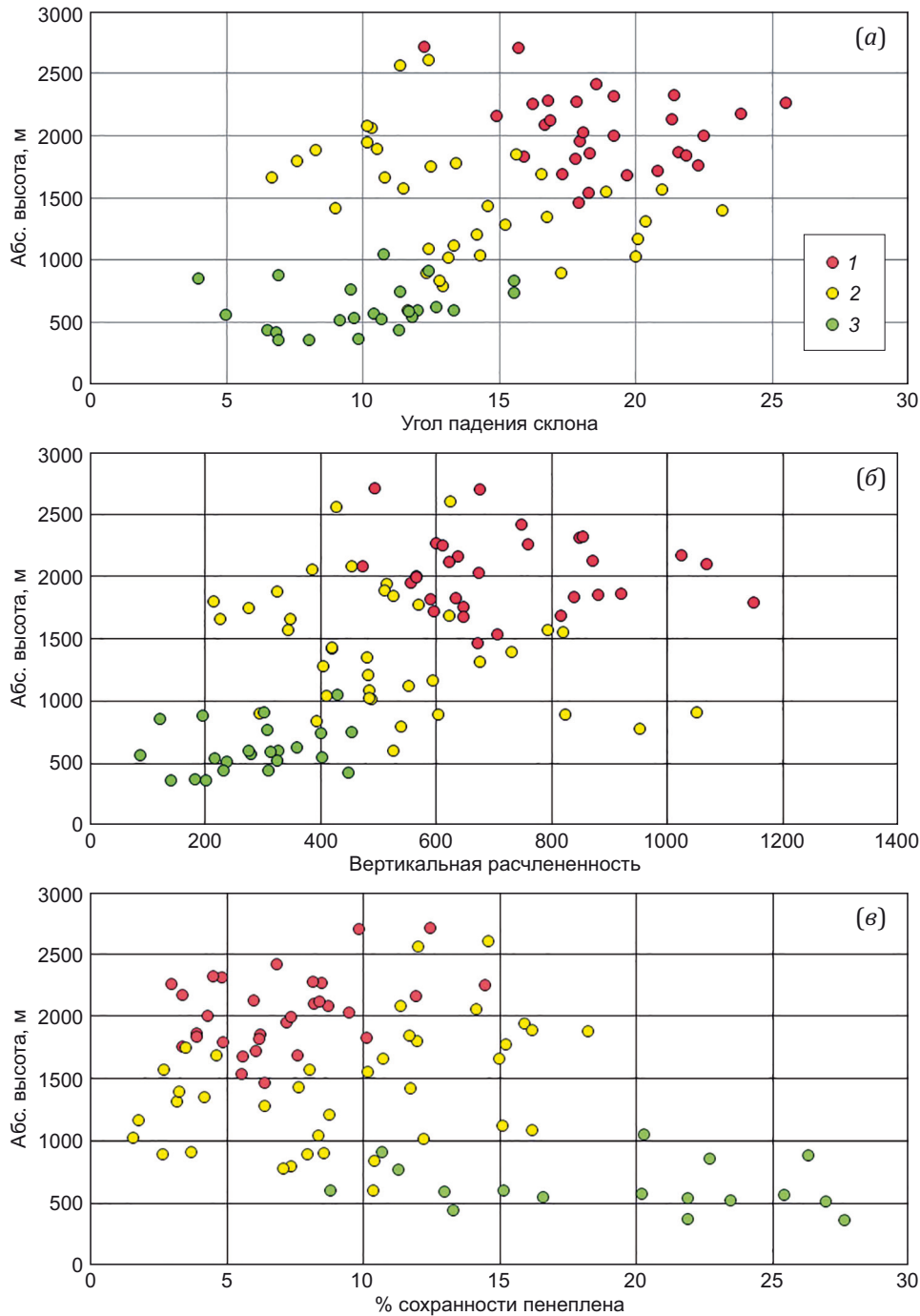


Рис. 3. Диаграммы попарного сравнения морфометрических показателей: (а) – абсолютная высота / угол падения склона; (б) – абсолютная высота / вертикальная расчлененность; (е) – абсолютная высота / % сохранности пенеплена. 1 – высокогорья; 2 – среднегорья; 3 – низкогорья.

Fig. 3. Pairwise comparison plots of morphometric indicators: (а) – absolute elevation vs. slope angle; (б) – absolute elevation vs. vertical dissection; (е) – absolute elevation vs. peneplain preservation (%). 1 – high-mountain zone; 2 – mid-mountain zone; 3 – low-mountain zone.

геоморфологической формации влияет на ее морфометрические показатели.

Интересный результат был получен для двух параметров, которые оказались статистически инвариантными для всех трех типов формаций. Горизонтальная расчлененность (густота речной сети) имеет практически идентичное среднее значение ~ 0.35 пог. км/км² для всех классов (см. рис. 2). Аналог этого показателя – плотность ребер рельефа, рассчитываемая через углы между склонами и отражающая густоту водораздельных линий, также не показала значимых различий. Полученная закономерность является подтверждением модели формирования горных сооружений Алтае-Саянской области в результате единого процесса – горизонтального сжатия. При этом происходит дробление литосферы с формированием структурных ансамблей, характерных для зон сдвига. Данный результат подтверждает выводы парагенетического анализа сети новейших разломов данной территории [Novikov et al., 2025], согласно которым все основные разрывные нарушения наметились еще на ранних этапах неотектонической активизации территории, и впоследствии развитие структурного ансамбля происходило по пути увеличения длины разрывов, их соединения в единую сеть и резкого увеличения амплитуд смещения на завершающем этапе.

Соответственно, общий рисунок и густота эрозионной сети были заложены на ранних этапах неотектонического развития территории. В дальнейшем, несмотря на значительную дифференциацию вертикальных движений и усиление денудации, унаследованная структура гидросети и расчленения оказалась устойчивой и консервативной. В ходе роста абсолютной высоты горных сооружений увеличивалась только глубина расчленения и углы наклона горных склонов. Следовательно, горизонтальная расчлененность и плотность ребер рельефа могут быть исключены из набора диагностических признаков для различения типов блоковых геоморфологических формаций Алтае-Саянской горной области. Таким образом, лишь четыре показателя являются набором морфометрических признаков, который позволяет осуществлять отнесение территории горных сооружений к одному из типов геоморфологических формаций горного ряда региона.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование является результатом интеграции предложенного Н.А. Флоренсовым и, по всей видимости, опередившего свое время формационного подхода в геоморфологии и современных методов цифровой морфометрии и геоинформационных технологий. На примере Алтае-Саянской горной области и прилегающих территорий Центральной Азии показана возможность использования количественных морфометрических признаков для геоморфологических исследований, количественно подтверждено и обосновано выделение трех основных геоморфологи-

ческих формаций – низкогорной, среднегорной и высокогорной и определены их диагностические морфометрические признаки. Установлено, что абсолютная высота, средний угол падения склонов, вертикальная расчлененность и степень сохранности поверхности выравнивания (пенеплена) достоверно различаются между формациями, отражая разные стадии развития рельефа и интенсивность неотектонических поднятий. Эти показатели могут служить надежными количественными критериями для их идентификации.

Выявлено, что по показателю густоты расчлененности рельефа геоморфологические формации не различаются. Если вертикальная расчлененность чутко реагирует на интенсивность новейших тектонических движений, то горизонтальная расчлененность (густота речной сети) и плотность водораздельных ребер оказались статистически одинаковыми для всех трех типов формаций. Это свидетельствует об унаследованности (консервативности) плановой структуры эрозионной сети, сформированной на ранних этапах развития территории и сохраняющейся несмотря на последующее усиление неотектонических движений и денудационных процессов. В то же время это может свидетельствовать о существенных вариациях вещественного состава толщ, на которых формируется эрозионная сеть и которые в данной статье не рассматривались. Полученные результаты имеют значение для развития формационного анализа в геоморфологии, методов геоморфологического районирования и палеогеографических реконструкций.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность д.г.-м.н. профессору В.Г. Трифонову (ГИН РАН) и к.г.-м.н. А.А. Щетникову (ИЗК СО РАН) за глубокий и конструктивный анализ, а также за доброжелательные и важные замечания.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Drăguț L., Eisank C., 2012. Automated Object-Based Classification of Topography from Digital Elevation Models. *Geomorphology* 141–142, 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.001>.

ESA, 2024. Copernicus Global Digital Elevation Model. <https://doi.org/10.5069/G9028PQB>.

Florensov N.A., 1971. On the Geological Formation. *Geomorphology* 2, 3–10 (in Russian) [Флоренсов Н.А. О геоморфологических формациях // Геоморфология. 1971. № 2. С. 3–10].

Geomorphological Map of the USSR, 1967. Scale of 1:7500000. All-Union Aerogeological Trust of the Ministry of Geology of the USSR, Moscow, 4 sheets (in Russian) [Геоморфологическая карта СССР. Масштаб 1:7500000. М.: Всесоюзный аэрогеологический трест Министерства геологии СССР, 1967. 4 л.].

Jasiewicz J., Stepinski T.F., 2013. Geomorphons – A Pattern Recognition-Based Approach to Classification of Landforms. *Geomorphology* 182, 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005>.

Kuznetsov Yu.A., 1964. Main Types of Magmatic Formations. *Nedra*, Moscow, 387 p. (in Russian) [Кузнецов Ю.А. Главные типы магматических формаций. М.: Недра, 1964. 387 с.].

Minár J., Evans I.S., Jenčo M., 2020. A Comprehensive System of Definitions of Land Surface (Topographic) Curvatures, with Implications for Their Application in Geoscience Modelling and Prediction. *Earth-Science Reviews* 211, 103414. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103414>.

Novikov I.S., 2024. Geomorphological Formations of the South of Western Siberia and Adjacent Territories. *Geomorphology and Paleogeography* 55 (4), 26–41 (in Russian) [Новиков И.С. Геоморфологические формации юга Западной Сибири // Геоморфология и палеогеография.

2024. Т. 55. № 4. С. 26–41]. DOI:10.31857/S2949178924040037.

Novikov I.S., Seminsky K.Zh., Krivov A.A., 2025. Paragenetic Analysis of the Recent Fault Network in Central Altai. *Geomorphology and Paleogeography* 59 (2), 307–322 (in Russian) [Новиков И.С., Семинский К.Ж., Кривов А.А. Парагенетический анализ сети новейших разрывных нарушений Центрального Алтая // Геоморфология и палеогеография. 2025. Т. 56. № 2. С. 307–322]. DOI:10.31857/S2949178925020092.

Shatsky N.S., 1965. *Fractions and Formations*. Nauka, Moscow, 232 p. (in Russian) [Шатский Н.С. Фации и формации. М.: Наука, 1965. 232 с.].

Shults S.S., 1948. *Neotectonic Analysis and Relief of the Tien Shan*. OGIЗ Geografiz, Moscow, 223 p. (in Russian) [Шульц С.С. Анализ новейшей тектоники и рельеф Тянь-Шаня. М.: ОГИЗ Географгиз, 1948. 223 с.].

Svarichevskaya Z.A., 1961. *Ancient Peneplain in Kazakhstan*. Leningrad State University, Leningrad, 265 p. (in Russian) [Сваричевская З.А. Древний пенеплен Казахстана. Л.: ЛГУ, 1961. 295 с.].

Tarboton D.G., Bras R.L., Rodriguez-Iturbe I., 1991. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. *Hydrological Processes* 5 (1), 81–100. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050107>.

Xiong L., Tang G., Yang X., Li F., 2021. Geomorphology-Oriented Digital Terrain Analysis: Progress and Perspectives. *Journal of Geographical Sciences* 31 (3), 456–476. <https://doi.org/10.1007/s11442-021-1853-9>.