



УДК 551.4.012 (571.53)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.54.57>

Типизация рельефа Верхнего Приангарья с использованием карт кривизны (на примере речных бассейнов Иркута, Китоя и Белой)

М. Ю. Опекунова*

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, Россия
Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

А. В. Бардаш

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

Аннотация. Приводятся результаты морфометрического анализа рельефа в пределах нижнего течения левых притоков р. Ангара. Для анализа использовалась пространственная дифференциация значений профильной, тангенциальной, общей и минимальной кривизн поверхности. Выявлено, что карты кривизн различных типов в разной степени отражают геологогеоморфологическое строение территории, распространение типов рельефа, распределение зон эрозии и аккумуляции на разных топологических уровнях. Показана возможность применения карт для выделения границ пойменно-террасовых комплексов, а также средненизкогорного и равнинного типов рельефа. Для р. Китой по карте минимальной кривизны проведена типизация рельефа, позволившая получить значения кривизны для разных типов рельефа, в том числе и флювиального. Сравнительный анализ кривизн поверхностей в пределах долин рек Белой, Иркута, Китой показал близкие средние значения профильной, общей и минимальной кривизн, характерных для плоских и вогнутых форм микрорельефа. В пределах пойменно-террасовых комплексов рассмотренных рек преобладают поверхности со значениями кривизны выше среднего близкими к нулю, что говорит о направленности аккумулятивных процессов и задержании воды во время прохождения паводков и затопления территории.

Ключевые слова: Верхнее Приангарье, речные долины, кривизна поверхности, эрозионно-аккумулятивные процессы.

Благодарности. Исследование выполнено за счет средств государственного задания (№ госрегистрации темы AAAA-A21-121012190017-5).

Для цитирования: Опекунова М. Ю., Бардаш А. В. Типизация рельефа Верхнего Приангарья с использованием карт кривизны (на примере речных бассейнов Иркута, Китоя и Белой) // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2025. Т. 54. С. 57–71. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.54.57>

Typification of the Relief of the Upper Angara Region Using Curvature Maps (Using the Example of the Irkut, Kitoy and Belya River Basins)

M. Yu. Opekunova*

*V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russian Federation
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation*

A. V. Bardash

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

Abstract. The results of a morphometric terrain analysis within the lower reaches of the left tributaries of the Angara River are presented. For the analysis, spatial differentiation of the values of profile, tangential, total and minimal surface curvatures was used. It was revealed that maps of curvatures of various types to varying degrees reflect the geological and geomorphic structure of the territory, the distribution of relief types, the distribution of erosion and accumulation zones at different topological levels. The possibility of using maps to highlight the boundaries of floodplain-terrace complexes, as well as mid-low mountain and flat relief types is shown. For Kitoy River, based on the map of minimal curvature, the relief was typified, which made it possible to obtain curvature values for different types of relief, including fluvial. A comparative analysis of surface curvatures within the valleys of the Belya, Irkut, and Kitoy Rivers showed close average negative values of profile, total and minimal curvatures, characteristics of flat and concave micro-relief forms. Within the floodplain-terrace complexes of the main rivers considered, surfaces with curvature values above average, close to zero, predominate, which indicates the direction of accumulative processes and water retention during floods and flooding of the territory.

Keywords: Upper Angara region, river valleys, surface curvature, erosion-accumulation processes.

For citation: Opekunova M.Yu., Bardash A.V. Typification of the Relief of the Upper Angara Region Using Curvature Maps (Using the Example of the Irkut, Kitoy and Belya River Basins). *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2025, vol. 54, pp. 57-71. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.54.57> (in Russian)

Введение

Морфометрический анализ [Погорелов, Думит, 2009; Харченко, 2020; Morphometric … , 2025], а в последние десятилетия, безусловно, и ГИС-анализ рельефа [Cartographic … , 2017; Quantitative … , 2020; Lateral … , 2023] – основа любого геоморфологического исследования.

Настоящие исследования фокусируются на выявлении направленности эрозионно-аккумулятивных процессов в речных долинах Верхнего Приангарья. В качестве объектов выступают рельефы бассейнов трех крупных восточно-саянских притока Ангарты – рек Иркут, Китой, Белой.

В процессе изучения определяются зоны эрозии и аккумуляции, как области плановых деформаций и затопления при прохождении экстремальных гидрологических явлений. Прикладное значение таких исследований неразрывно связано с рациональным природопользованием и минимизацией негативных для человека явлений.

Изучению геологического строения, рельефа и флювиального рельефообразования территории исследования посвящен значительный объем работ [Логачев, Ломоносова, Климанова, 1964; The Functioning … , 2020; Channel … , 2023].

Настоящий морфометрический анализ рельефа нижнего течения левобережных притоков позволит дополнить ранние геоморфологические исследования авторов [Опекунова, Бардаш, 2022; Channel … , 2023] и других ученых [Козырева, Бабичева, Мазаева, 2018; The Functioning … , 2020]. Для первоначального анализа рельефа предлагается выявить количественные характеристики современного флювиального рельефа, используя карты коэффициента кривизны поверхностей. Значения данных коэффициентов определяются соотношением процессов эрозии, аккумуляции и транзита осадков. Для этого на данном этапе предполагается: 1) оценить возможность применения карт кривизны для типизации рельефа территории; 2) провести сравнительную оценку показателей кривизны рельефа для трех притоков верхнего течения р. Ангары. На основании полученных данных в дальнейшем предполагается провести сравнительную оценку эрозионно-аккумулятивного потенциала рельефа трех основных притоков Ангари.

Территория и методы исследования

Большую часть территории исследования занимают равнины с почти плоскими междуречьями с хорошо развитыми пойменно-террасовыми комплексами речных долин, которые в юго-западном направлении сменяются полосой предгорий (рис. 1). Территория характеризуется значительным антропогенным преобразованием рельефа [Козырева, Бабичева, Мазаева, 2018; Овчинников, Павлов, Тржцинский, 1999], а также синхронностью прохождения опасных гидрологических явлений [Channel … , 2023].

Развитие рассматриваемых речных долин определяется их горноравнинным положением, сложным морфоструктурным строением зоны сопротивления орогенной и платформенной областей.

Область исследования представлена сочетанием среднегорного, низкогорного и равнинного типов рельефа [Атлас, 2004]. Относительные высотные отметки водораздельных поверхностей варьируют от 500 до 1100 м. Величина эрозионного вреза долин меняется от 80 до 500 м.

Территория исследования располагается в поле распространения кристаллических пород (гранитов и гранитогнейсов) архейско-протерозойского и осадочных пород (песчаников, алевролитов) юрского и кембрийского возрастов, отклонения речных долин представлены аллювиальными четвертичными отложениями [Государственная … , 2009].

Река Белая характеризуется наибольшим разнообразием распространенных здесь пойменно-русловых типов, большую часть занимают адаптированный и врезанный типы русла, меньшую – широкопойменный. Пойма представлена сочетанием ложбинно-островных и сегментно-островных участков, а также скелетного типа на участках врезания. Пойменный комплекс обладает признаками направленного врезания, имеет ступенчатое строение, включает три высотных уровня – низкую, среднюю и высокую пойму. Смена типов пойменно-русловых комплексов р. Белой обусловлена морфоструктурным строением территории, имеет линейный характер сектором вниз по течению.

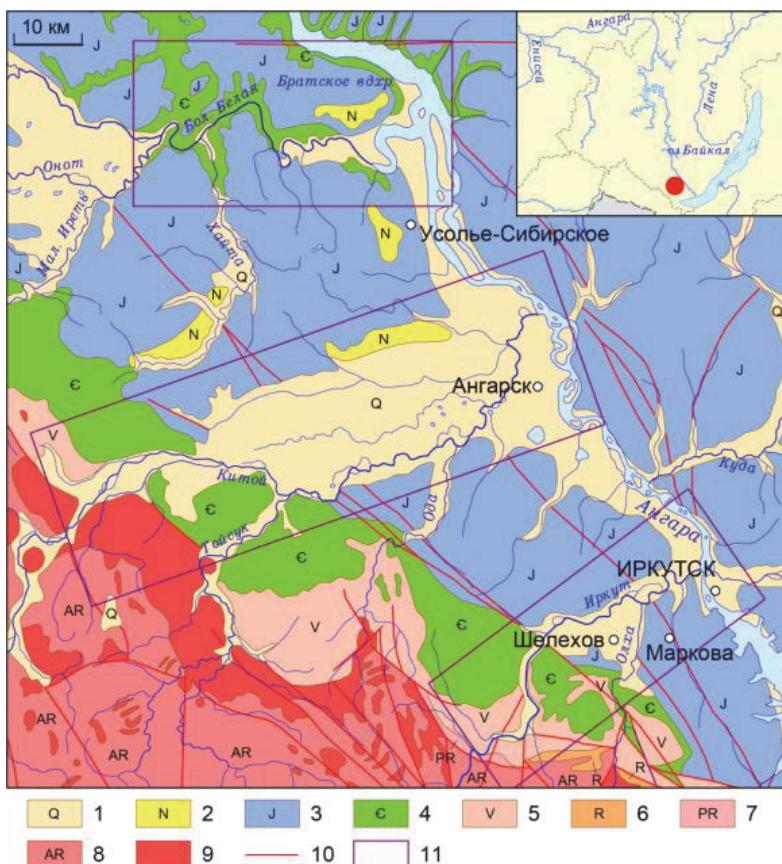


Рис. 1. Геологическая схема территории исследования. Карта-врезка – ситуационная схема.

Условные обозначения: отложения: 1 – четвертичной системы; 2 – неогеновой системы; 3 – юрской системы; 4 – кембрийской системы; 5 – вендинской системы; 6 – рифейской системы; 7 – протерозойской системы; 8 – архейской системы; 9 – интрузивные комплексы архейской и протерозойской систем; 10 – разломы; 11 – границы участков исследования

Река Иркут характеризуется широкопойменным русловым типом с вынужденными излучинами, пойменными, одиночными простыми и сложными типами разветвлений, – такой тип русла занимает 60,4 км. На протяжении 15 км получил развитие двурукавный тип разветвления, для остальной части характерен адаптированный тип русла. Получили развитие ложбинно- и сегментно-островные типы пойм.

Для р. Китой на исследуемой территории характерно широкопойменное русло, преимущественно с пойменно-русловым типом разветвления и адаптированными излучинами. Пойменные сложно построенные массивы р. Китой включают несколько генераций, а также усложняются элементами пойм рек Картагон и Целоты. В пределах Китайского заболоченного расширения – зоны молодых опусканий можно наблюдать поперечный направлению течения тип смены пойменных массивов.

Для построения карт кривизны рельефа с целью дальнейшей его интерпретации, оценки территории для развития опасных флювиальных процессов были выполнены: проекционные преобразования, фильтрация и гидрологическая коррекция исходной ЦМР; составление частных карт кривизны поверхностей.

Все расчеты производились в настольной ГИС SAGA [System ... , 2015]. Основой послужила цифровая модель поверхности SRTM с разрешением одна угловая секунда¹⁸. Последующая обработка заключалась в сглаживании данных с использованием метода Дж. Вуда [Wood, 1996], при котором происходило аппроксимирование значений методом наименьших квадратов (радиус скользящего окна был установлен в пять ячеек).

Разные типы кривизны поверхности характеризуют не только морфологию и морфометрические характеристики рельефа, но и отражают функционирование морфолитосистем, в частности флювиальных и склоновых.

Для определения значений кривизны используются специальные алгоритмы, такие как метод Zevenbergen – Thorne [Zevenbergen, Thorne, 1987], который широко применяется в геоморфологии. Результаты расчетов выражаются в единицах м^{-1} , что позволяет сравнивать характеристики разных участков рельефа [Shary, Sharaya, Mitusov, 2002; Florinsky, 2007].

Вертикальная кривизна отражает изменение уклона поверхности вдоль ее основного направления. Она описывает второй механизм аккумуляции – замедление потоков воды и переносимых ею частиц. Отрицательные значения вертикальной кривизны указывают на вогнутые участки, где потоки замедляются, способствуя накоплению осадков. Положительные значения соответствуют выпуклым участкам, где поток ускоряется, вызывая размывание грунта.

Горизонтальная кривизна характеризует изменение экспозиции поверхности по мере движения вдоль определенного направления. Этот тип кривизны описывает первый механизм аккумуляции – сближение линий тока в плане. Отрицательные значения соответствуют зонам конвергенции, где линии тока сходятся, что приводит к увеличению концентрации осадочного материала. Положительные значения отражают зоны дивергенции, где линии тока расходятся, уменьшая концентрацию осадков [Shary, Sharaya, Mitusov, 2002; Florinsky, 2007].

Тангенциальная кривизна определяется как произведение плановой кривизны на крутизну склона. Этот показатель помогает различать рассеивающие и концентрирующие поверхности. Он особенно важен для оценки процессов перераспределения вещества на склонах различной формы.

Минимальная кривизна показывает наименьшие значения кривизны поверхности и используется для выявления особенностей эрозионно-русловых сетей и межрусловых поверхностей. Ее отрицательные значения ассоциируются с эрозионными формами рельефа, такими как русла рек и овраги, тогда как положительные значения характерны для водоразделов и возвышенностей.

¹⁸ Shuttle Radar Topography Mission 1 Arc-Second Global. <https://doi.org/10.5066/F7PR7TFT>

При анализе цифровых моделей рельефа часто возникает проблема шума и ошибок измерений. Для устранения этих факторов применяются методы предварительной фильтрации и аппроксимации поверхности. Эти процедуры позволяют сосредоточиться на мезоформах рельефа, исключив мелкие детали, которые могут искажать общую картину распределения литопотоков.

Для полной оценки эрозионной опасности, а также опасности затопления территории необходимо использовать результаты анализа комплекса карт кривизны поверхности, которые позволяют учитывать особенности функционирования флювиальных и склоновых морфолитосистем.

Результаты и их обсуждение

Анализ карт профильной кривизны. Сочетание ареалов максимальных и минимальных значений вертикальной кривизны для территории исследования маркируют следующие геоморфологические элементы: 1) границы элементов крупных речных долин (сочетания наиболее крутых склонов и вогнутых (тыловые швы) или плоских участков днищ долин); границы русел и пойм; границы пойменных массивов и террас; 2) врезанные долины и русла низких порядков.

Значения вертикальной (профильной) кривизны (kv) в пределах рассматриваемой территории изменяются от $-0,0030$ до $0,0027 \text{ м}^{-1}$ (рис. 2). Большую часть территории исследования занимают заболоченные поверхности пойменно-террасового комплекса, которым соответствуют значения $kv \sim 0$. Для склоновых поверхностей, а также водоразделов значения kv увеличиваются. Для тальвегов, тыловых швов и собственно русел kv изменяется от $-0,0001$ до $0,0005 \text{ м}^{-1}$.

Сочетание участков с различными значениями кривизны образует своеобразный рисунок, позволяющий определять не только тип рельефа, но и разные типы отложений (см. рис. 1). Так, для среднегорья-низкогорья бассейнов рек Китой и Иркут (рис. 2, б, в) в поле распространения архейских, протерозойских и кембрийских отложений отмечается сочетание ареалов с максимальными отрицательными и положительными значениями. В пределах равнинного мелкорасчлененного рельефа характерны значения кривизны от $0,0003 \text{ м}^{-1}$ и ниже.

В долине р. Белой сочетания ареалов с максимальными отрицательными и положительными значениями характерны для склонов долин, где также вскрываются отложения кембраия.

В целом днища долин характеризуются значениями от $-0,0008$ до $0,0008 \text{ м}^{-1}$, коррелируют с ранее рассчитанными интервалами от $-0,0013$ до $0,0013 \text{ м}^{-1}$, рассчитанными для рельефа Иркутско-Черемховской равнины в границах долины р. Ии в пределах [Опекунова, Бардаш, 2022].

Для рек Иркут и Белой характерны идентичные интервалы вертикальной кривизны в днищах долин, что указывает на одинаковое развитие профиля поверхностей, однако этот показатель оказался выше у р. Китой.

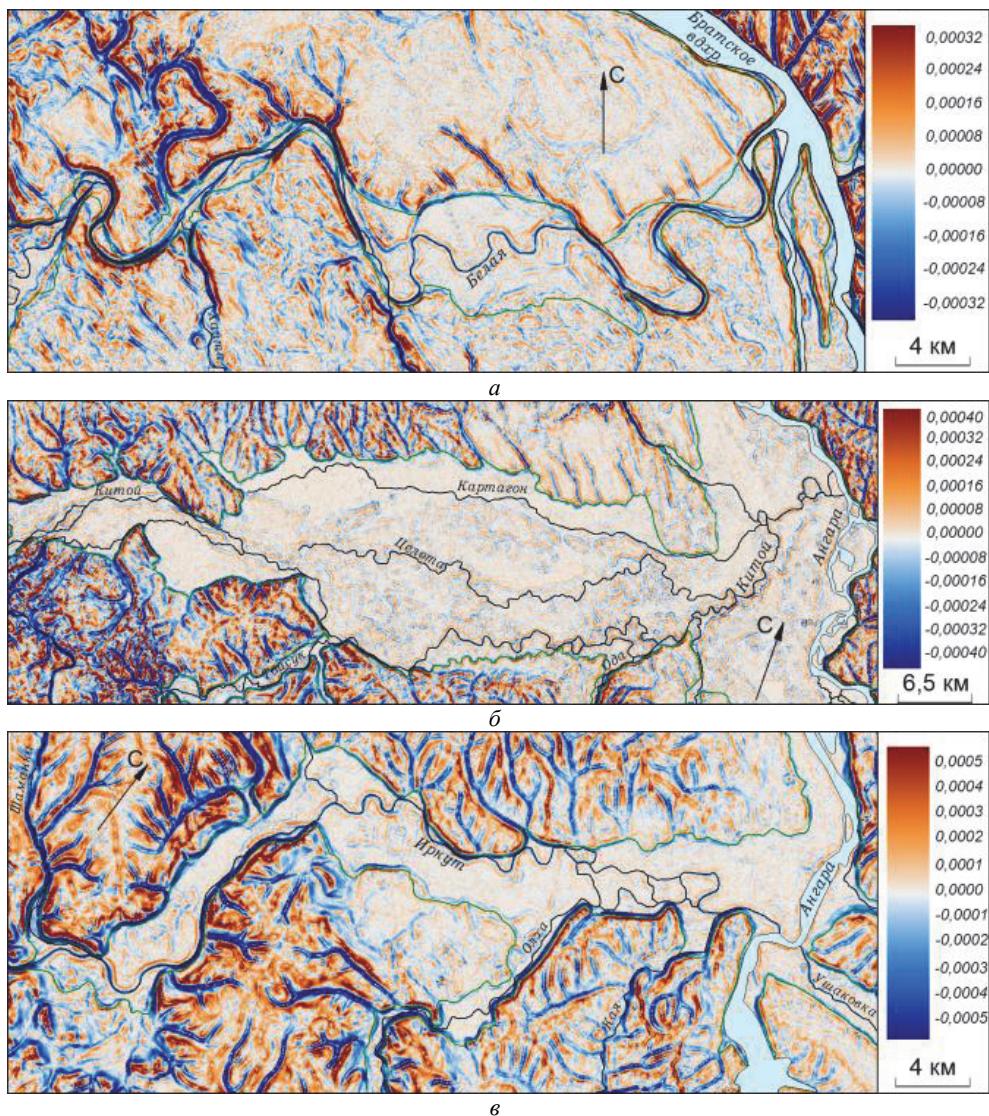


Рис. 2. Карты профильной кривизны рельефа бассейнов левых притоков р. Ангара в верхнем течении: *a* – р. Белая; *б* – р. Китой; *в* – р. Иркут. Зеленой линией выделены границы днищ долин

Средние значения коэффициента профильной кривизны отрицательные в днищах всех рассматриваемых, что говорит о преобладании вогнутых профилей в зонах замедления, аккумулирующих наносы и воду (при обводнении территории). Отрицательные средние значения коэффициента асимметрии и его величины (от –5 до –3,54), а также значения третьего квартиля свидетельствуют о преобладании вогнутых либо прямых профильных поверхностей со значениями кривизны выше среднего.

В днище долины р. Китой преобладают поверхности с более высокими значениями коэффициента кривизны. В пределах междуречий кривизна имеет нулевые значения, что говорит об уравновешении вогнутых и выпуклых склонов.

Анализ карт тангенциальной кривизны. Значения тангенциальной кривизны территории варьируют в пределах от $-0,0021$ до $0,0020 \text{ м}^{-1}$ (рис. 3).

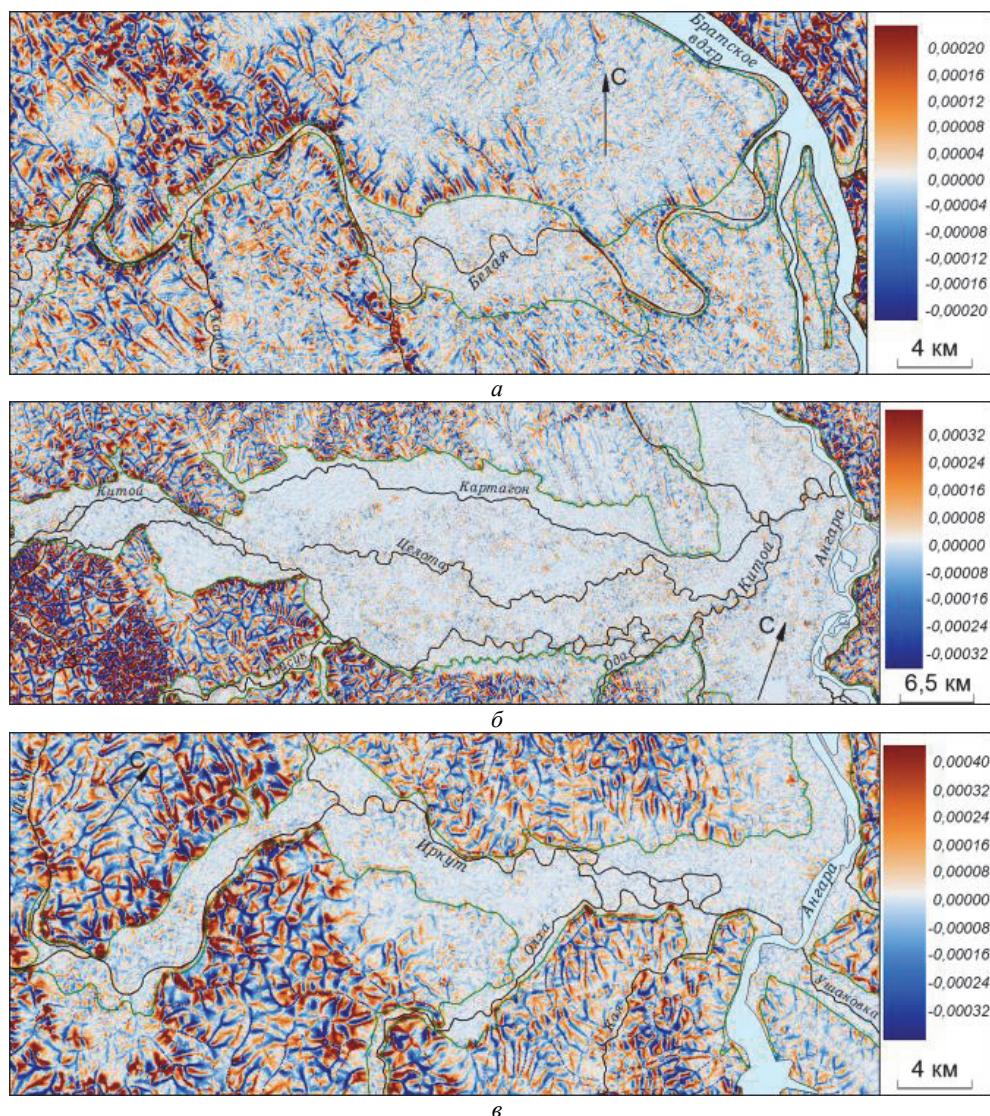


Рис. 3. Карты тангенциальной кривизны рельефа бассейнов левых притоков р. Ангары в верхнем течении:
а – р. Белая; б – р. Китой; в – р. Иркут

Распределение ареалов образует древовидный рисунок потоков в пределах междуречий, соответствующий пологоволнистому и пологохолмистому низкогорному и равнинным типам рельефа (см. рис. 3). Для рассматриваемой территории карты тангенциальной кривизны хорошо отражают эрозионную сеть в пределах склонов долин и междуречий. Пойменные и террасовые уровни уверенно выделяются по разному рисунку сочетания кривизн внутри ареалов. Амплитуды максимальных и минимальных значений тангенциальной кривизны в днищах долин незначительны, среднеквадратичное отклонение варьирует от 0,00007 до 0,00009.

Средние значения тангенциальной кривизны – положительные, что свидетельствует о незначительном преобладании зон рассеивания (дивергенции потоков) в днищах долин рек Иркут и Белой, более низкие значения для днища р. Китой говорят о его почти плоской поверхности. Таким образом, тангенциальная кривизна элементов положительных микроформ пойменного и террасового рельефа способствует незначительному разделению потоков и перераспределению его в зоны аккумуляции (отрицательные формы микрорельефа).

Анализ карт общей кривизны. Значения общей кривизны варьируют в пределах от -0,0053 до 0,0067. Максимальные значения – в бассейне р. Белой. Амплитуды максимальных и минимальных значений общей кривизны в днищах долин почти одинаковы для рек Китой и Белой, что указывает на большую схожесть в развитии пойменно-русловых, террасовых комплексов, и выше у р. Иркут.

Средние значения общей кривизны для днищ долин всех рассматриваемых рек имеют отрицательные значения, у р. Китой оно наиболее близко к нулю, что говорит о более выпущенной поверхности и уравновешивании процессов эрозии-аккумуляции.

Анализ минимальной кривизны. Эрозионно-русловая сеть и локальные вогнутые, в том числе и антропогенные формы рельефа, характеризуются наименьшими значениями минимальной кривизны (рис. 5). Наибольшие площади ареалов отрицательных значений минимальной кривизны характерны для р. Иркут, и в меньшей степени – для долин рек Белой и Китой. В методическом плане ареалы минимальных значений могут учитываться как территории с потенциальной опасностью затопления и подтопления.

В долине р. Белой значения данного коэффициента от минимальных до нулевых оконтуривают на уровне микрорельефа фрагменты староречий, поймы сегментно-гривистого типа. На более высоком иерархическом уровне ареалы минимальных значений соответствуют участкам врезанного и адаптированного русловых типов. На междуречьях, склонах долин ареалы минимальных значений оконтуривают зоны основных разрывных дислокаций этого участка северо-западного простирания, которые в рельефе фиксируются распространением малых эрозионных форм.

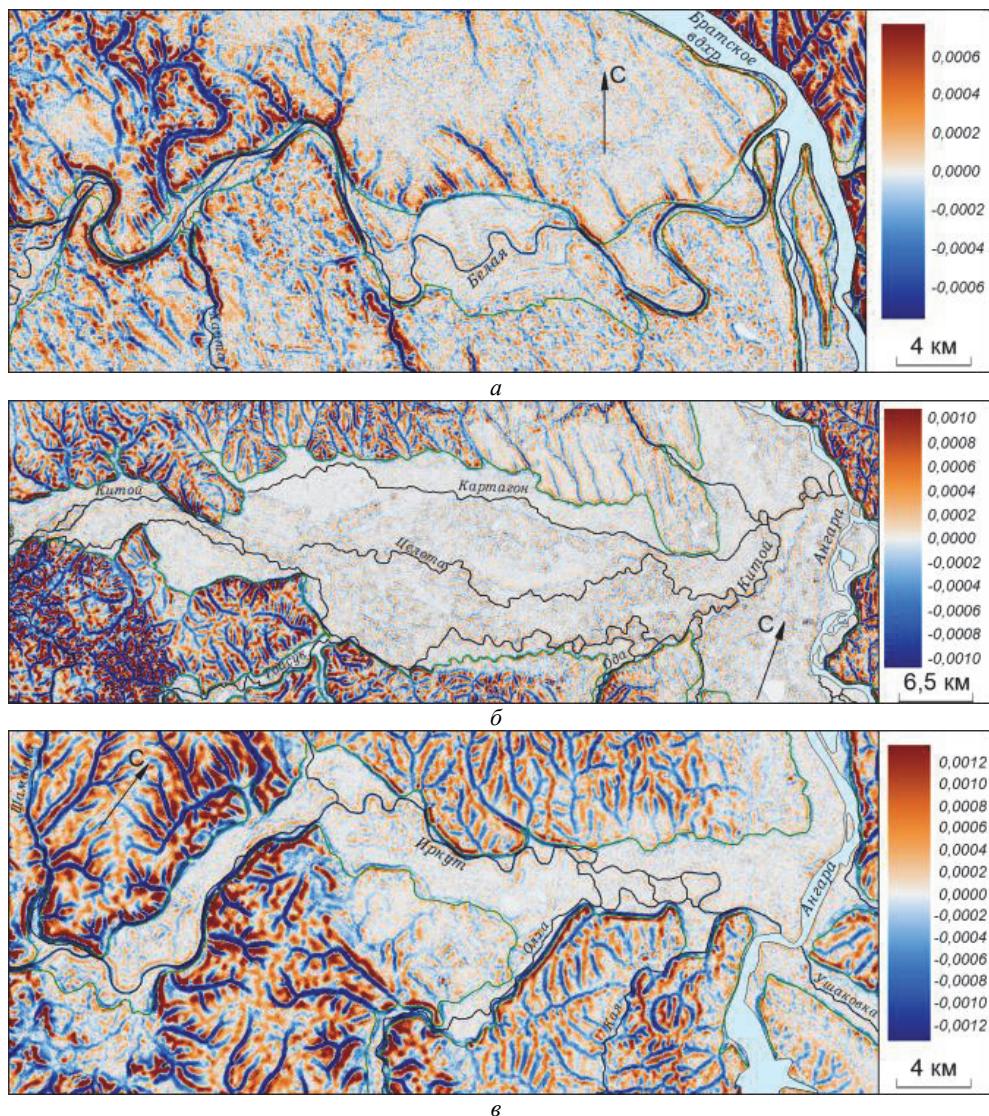


Рис. 4. Карты общей кривизны рельефа бассейнов левых притоков р. Ангары в верхнем течении: *а* – р. Белая; *б* – р. Китой; *в* – р. Иркут

Для долины р. Китой отрицательные и нулевые значения минимальной кривизны оконтуривают эрозионную сеть – фрагменты староречья, днища ложбин, систему отмерших проток. На склонах и междуречьях в юго-восточной части участка ареалы минимальных значений группируются в поле распространения протерозойских отложений, фиксируя хорошо развитую эрозионную сеть.

Типы рельефа (табл. 1) коррелируют с разными типами рисунка кривизны (рис. 5).



Рис. 5. Типизация рельефа долины р. Китой на основе карты минимальной кривизны. Зеленой линией выделены границы днищ долин, красной – границы типов рельефа

Таблица 1

Типы рельефа, основанные на показателях минимальной кривизны

Номер выдела	Тип рельефа	Элемент рельефа	Характерные особенности функционирования эрозионно-русловых систем
Предгорная часть бассейна (склоны долины и междуречья)			
1	Средне- и низкогорный денудационно-тектонический	Плоские, полого-волнистые и полого-холмистые водоразделы, склоны крутые, средней крутизны, пологие	Равновесный рельеф с незначительным преобладанием значений выше среднего, равновесие эрозионных и аккумулятивных процессов
Предгорно-равнинная часть бассейна (склоны долины и междуречья)			
2	Равнинный плоско-вершинный, полого-холмистый денудационно-эрзационный	Плоские, полого-волнистые и полого-холмистые водоразделы, склоны крутые, средней крутизны, пологие	Незначительное преобладание более выпуклых форм рельефа, равновесие эрозионных и аккумулятивных процессов
3	Низкогорный денудационно-эрзационный, равнинный полого-холмистый	Полого-холмистые водоразделы, склоны средней крутизны и пологие	Незначительное преобладание более выпуклых форм рельефа, равновесие эрозионных и аккумулятивных процессов
Пойменно-террасовые комплексы речных долин			
4	Пологоволнистый равнинный аккумулятивный	Поверхности террас нижнеплейстоценового возраста. Высокие полигенетические поверхности периферической части Китайской впадины, частично долины малых рек	Выровненная поверхность, преобладание выпуклых поверхностей незначительно, равнозначное развитие эрозионных и аккумулятивных процессов
5	Пологоволнистый и гравийный аккумулятивный	Поверхности проточно-островных и ложбинно-островных пойм	Преобладание более выпуклых форм рельефа, равновесие эрозионных и аккумулятивных процессов
6	Пологоволнистый и плоский аккумулятивный	Поверхности террас нижнеплейстоценового возраста, высоких пойм голоценового возраста	Выровненная поверхность с незначительным преобладанием более выпуклых форм, расчлененная отрицательными формами (с увеличением их вогнутости, уменьшается их встречаемость), преобладание процессов направленной эрозии

От средне-низкогорного к равнинному типу рельефа в пределах территории исследования увеличиваются средние значения минимальной кривизны. Для пойменно-террасового комплекса (см. рис. 5, выделы 4–6) значения кривизны близки к нулю. Для склонового рельефа и водоразделов коэффициент асимметрии указывает на равновесие эрозионно-аккумулятивных процессов. Исключение представляет крутой эрозионный правый борт долины р. Ангары (табл. 2, рис. 5). Минимальный коэффициент асимметрии характерен для низких и проточно-островных пойм и характеризует неоднородное строение микрорельефа, представленное сочетанием проток (ложбин) и межпроточными пространствами (см. рис. 5, табл. 2). Смоделированный нефлювиальными процессами рельеф высоких террас, напротив, имеет более низкие значения коэффициента асимметрии.

Таблица 2

Статистические показатели морфометрических параметров бассейна р. Китой

Номер выдела	Площадь, км ²	Минимум*	Максимум	Среднее	Медиана	Мода	Ср. кв. отклонение	Q1	Q2	Q3	Асимметрия	Эксцесс
1	211,9	-0,0030	0,0011	-0,00041	-0,0003	-0,0002	0,00042	-0,0006	-0,0003	-0,0001	-1,10	2,14
2	83,6	-0,0022	0,0007	-0,00027	-0,0002	-0,0001	0,00030	-0,0004	-0,0002	-0,0001	-1,18	1,59
3	590,8	-0,0024	0,0008	-0,00020	-0,0001	-0,0001	0,00022	-0,0003	-0,0001	-0,0001	-1,60	5,16
4	176,8	-0,0005	0,0003	-0,00006	0	0	0,00007	-0,0001	0,0000	0,0000	-1,07	1,94
5	949,4	-0,0036	0,0026	-0,00003	0	0	0,00025	-0,0001	0,0000	0,0001	-3,20	22,59
6	148,9	-0,0027	0,0008	-0,00003	0	0	0,00015	-0,0001	0,0000	0,0000	-5,45	57,25

Примечание: все значения минимальной кривизны (k_{min}) приведены в м⁻¹. Минимальные, максимальные, средние, медианные, модальные, среднеквадратичные отклонения, коэффициент асимметрии, эксцесс, а также значения квартилей (Q1, Q2, Q3), значений, которые ранжируют набор данных на четыре равные части приведены для выделов (типов рельефа).

Заключение

Анализ карт кривизны показал возможность типизации рельефа по характеру рисунка сочетаний ареалов (см. рис. 2–4). В большей степени это характерно для карт профильной кривизны (см. рис. 2), на которых отчетливо выделяются тыловые швы днищ долин, в меньшей степени – для тангенциальной кривизны. Типы рельефа наиболее четко определяются по картам минимальной кривизны, где хорошо отражаются характер и величина горизонтального и вертикального расчленения рельефа как в пределах междуречий, так и в днищах долин.

Рельеф в долинах рек Иркут и Белой характеризуется почти одинаковым преобладанием значений профильной, общей и минимальной кривизн выше средних. Для днища р. Китой эти значения оказались выше при отрицательной асимметрии распределения, что в целом указывает на распространение плоских поверхностей.

Используя значения коэффициента асимметрии, как показателя соотношения значений больше или меньше среднего, а также значения эксцесса,

можно сделать вывод о соотношении процессов эрозии и аккумуляции. На примере рассмотренного участка бассейна р. Китой видна тенденция увеличения более выпуклых поверхностей в плане, что с большой долей условности определяется как увеличение направленности процессов эрозии от склонов долин к днищу.

Из этой выборки исключаются полигенетические поверхности и высокие террасы обрамления Китайской впадины, где процессы эрозии и аккумуляции уравновешены. Также проточно- и ложбинно-островные поймы будут иметь в общем меньший эрозионный потенциал, нежели заболоченные пространства пойменных массивов периферии Китайской впадины, что связано с большей контрастностью микрорельефа.

Таким образом, анализ составленных карт показал их применимость для выделения различных морфогенетических типов рельефа в пределах рассматриваемой территории. Анализ кривизны поверхности днищ долин левобережья р. Ангары уточняет характеристику микрорельефа и его многоуровневого распределения, позволяя выявлять уязвимые зоны при прохождении паводков, затоплении территории.

Список литературы

Атлас Иркутской области: Экологические условия развития / ред. В. В. Воробьев, А. Н. Антипов, В. Ф. Хабаров. Иркутск : Изд-во Ин-та географии СО РАН ; М. : Роскартография, 2004. 90 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 1 000 000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист N-48 – Иркутск. Объяснительная записка. СПб. : Картфабрика ВСЕГЕИ, 2009. 574 с.

Козырева Е. А., Бабичева В. А., Мазаева О. А. Трансформация геологической среды в зоне влияния водохранилищ Ангарского каскада ГЭС // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2018. Т. 25. С. 66–87. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.25.66>

Логачев Н. А., Ломоносова Т. К., Климанова В. М. Кайнозойские отложения Иркутского амфитеатра. М. : Наука, 1964. 195 с.

Овчинников Г. И., Павлов С. К., Тржцинский Ю. Б. Изменение геологической среды в зоне влияния Ангаро-Енисейских водохранилищ. Новосибирск : Наука, 1999. 254 с.

Опекунова М. Ю., Бардаш А. В. Морфометрический анализ рельефа бассейна р. Ии (Иркутская область) // География и природные ресурсы. 2022. № 1. С. 102–109. <https://doi.org/10.15372/GIPR20220111>

Погорелов А. В., Думит Ж. А. Рельеф бассейна р. Кубани: Морфологический анализ. М. : ГЕОС, 2009. 207 с.

Харченко С. В. Новые задачи морфометрии рельефа и автоматизированные морфологические классификации в геоморфологии // Геоморфология. 2020. № 1. С. 3–21. <https://doi.org/10.31857/S043542812001006X>

Cartographic Model of River Basins of European Russia / O. P. Ermolaev [et al.] // Geography and Natural Resources. 2017. Vol. 38, N 2. P. 131–138.

Channel deformations and hazardous processes of the left-bank tributaries of the Angara River (Eastern Siberia) / M. Yu. Opekunova, N. V. Kichigina, A. A. Rybchenko, A. V. Silaev // Water. 2023. Vol. 15, N 2. P. 291.

Florinsky I. V. Solving Three Problems of Exploration and Engineering Geology by Digital Terrain Analysis // International Journal of Ecology & Development. 2007. Vol. 8, N F07. P. 52–65.

Lateral moraine failure in the valley of the djankuat catchment (central caucasus) and subsequent morphodynamics / A. Kedich, S. Kharchenko, A. Tsyplenkov, V. Golosov // Geomorphology. 2023. Vol. 441. P. 108896.

Morphometric analysis for understanding river basin hydrology: a case of Gelda watershed, Tana Sub-Basin, Ethiopia / D. W. Melsse, M. A. Tegegne, Y. A. Mekonnen, Y. T. Bihon // Applied Water Science. 2025. Vol. 15, N 171. <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02526-x>

Quantitative Morphometric and Morphotectonic Analysis of Pahuj Catchment Basin, Central India / S. C. Bhatt, R. Singh, M. A. Ansari, S. Bhatt // Journal of the Geological Society of India. 2020. Vol. 96. P. 513–520.

Shary P. A., Sharaya L. S., Mitusov A. V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. 2002. Vol. 107, N 1-2. P. 1–32.

System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 / O. Conrad [et al.] // Geoscientific Model Development. 2015. Vol. 8. P. 1991–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>

The Functioning of Erosion-channel Systems of the River Basins of the South of Eastern Siberia / O. I. Bazhenova [et al.] // Geosciences. 2020. Vol. 10. N 5. P. 176–186. <https://doi.org/10.3390/geosciences10050176>

Wood J. D. The Geomorphological Characterization of Digital Elevation Models: Ph. D. Thesis. Leicester : University of Leicester, 1996. 193 p.

Zevenbergen L. W., Thorne C. R. Quantitive analisis of land surface topography // Earth Surface Processes and Landforms. 1987. Vol. 12. P. 47–56.

References

Atlas Irkutskoi oblasti: Ekologicheskie usloviya razvitiya [Atlas of Irkutsk Region: Ecological Development Conditions]. Eds. V.V. Vorobyev, A.N. Antipov, V.F. Khabarov. Irkutsk, Institute of Geography SB RAS Publ., Moscow, Roskartografiya Publ., 2004, 90 p. (in Russian)

Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1: 1 000 000 (3-e pokolenie). Seriya Angaro-Eniseiskaya. List N-48 – Irkutsk. Ob'yasnitelnaya zapiska [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1: 1,000,000 (3rd generation). Angara-Yenisei Series. Sheet N-48 – Irkutsk. Explanatory Note]. St. Petersburg, Kartfabrika VSEGEI Publ., 2009, 574 p. (in Russian)

Kozyreva E.A., Babicheva V.A., Mazaeva O.A. Transformatsiya geologicheskoi sredy v zone vliyaniya vodokhranilishch Angarskogo kaskada GES [Transformation of the Geological Environment in the Influence Zone of the Angara Cascade of HPP Reservoirs]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle* [The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences], 2018, vol. 25, pp. 66-87. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.25.66> (in Russian)

Logachev N. A., Lomonosova T. K., Klimanova V. M. *Kainozoiskie otlozheniya Irkutskogo amfiteatra* [Cenozoic Deposits of the Irkutsk Amphitheater]. Moscow, Nauka Publ., 1964, 195 p. (in Russian)

Ovchinnikov G.I., Pavlov S.K., Trzhitsinskii Yu.B. *Izmenenie geologicheskoi sredy v zone vliyaniya Angaro-Eniseiskikh vodokhranilishch* [Change of the Geological Environment in the Influence Zone of the Angara-Yenisei Reservoirs]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1999, 254 p. (in Russian)

Opekunova M.Yu., Bardash A.V. *Morfometricheskii analiz rel'efa basseina r. Ii (Irkutskaya oblast)* [Morphometric Analysis of the Relief of the Iya River Basin (Irkutsk Region)]. *Geografiya i prirodye resursy* [Geography and Natural Resources], 2022, no. 1, pp. 102-109. <https://doi.org/10.15372/GIPR20220111> (in Russian)

Pogorelov A.V., Dumit Zh.A. *Relief basseina r. Kubani: Morfologicheskii analiz* [Relief of the Kuban River Basin: Morphological Analysis]. Moscow, GEOS Publ., 2009, 207 p. (in Russian)

Kharchenko S.V. Novye zadachi morfometrii rel'efa i avtomatizirovannye morfologicheskie klassifikatsii v geomorfologii [New Tasks of Relief Morphometry and Automated Morphological Classifications in Geomorphology]. *Geomorfologiya* [Geomorphology], 2020, no. 1, pp. 3-21. <https://doi.org/10.31857/S043542812001006X> (in Russian)

Ermolaev O.P., Mal'tsev K.A., Mukharamova S.S., Kharchenko S.V., Vedeneeva E.A. Cartographic Model of River Basins of European Russia. *Geography and Natural Resources*, 2017, vol. 38, no. 2, pp. 131-138.

Opekunova M.Yu., Kichigina N.V., Rybchenko A.A., Silaev A.V. Channel deformations and hazardous processes of the left-bank tributaries of the Angara River (Eastern Siberia). *Water*, 2023, vol. 15, no. 2, art. 291.

- Florinsky I.V. Solving Three Problems of Exploration and Engineering Geology by Digital Terrain Analysis. *International Journal of Ecology & Development*, 2007, vol. 8, no. F07, pp. 52-65.
- Kedich A., Kharchenko S., Tsypplenkov A., Golosov V. Lateral moraine failure in the valley of the djankuat catchment (central caucasus) and subsequent morphodynamics. *Geomorphology*, 2023, vol. 441, art. 108896.
- Melsse D.W., Tegegne M.A., Mekonnen Y.A., Bihon Y.T. Morphometric analysis for understanding river basin hydrology: a case of Gelda watershed, Tana Sub-Basin, Ethiopia. *Applied Water Science*, 2025, vol. 15, art. 171. <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02526-x>
- Bhatt S.C., Singh Rubal, Ansari M.A., Bhatt S. Quantitative Morphometric and Morphotectonic Analysis of Pahuj Catchment Basin, Central India. *Journal of the Geological Society of India*, 2020, vol. 96, pp. 513-520.
- Shary P. A., Sharaya L. S., Mitusov A. V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, 2002, vol. 107, no. 1-2, pp. 1-32.
- Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 2015, vol. 8, pp. 1991–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
- Bazhenova O.I., Bardash A.V., Makarov S.A. et al. The Functioning of Erosion-channel Systems of the River Basins of the South of Eastern Siberia. *Geosciences*, 2020, vol. 10, no. 5, pp. 176-186. <https://doi.org/10.3390/geosciences10050176>
- Wood J. D. *The Geomorphological Characterization of Digital Elevation Models*. Ph. D. Thesis. Leicester, University of Leicester, 1996, 193 p.
- Zevenbergen L.W., Thorne C.R. Quantitive analisis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1987, vol. 12, pp. 47-56.

Сведения об авторах

Опекунова Марина Юрьевна
кандидат географических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория геоморфологии
Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 1
старший научный сотрудник,
Сибирская школа геонаук
Иркутский национальный исследовательский
технический университет
Россия, 664074, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 83
e-mail: opek@mail.ru

Бардаш Александр Владимирович
кандидат географических наук,
научный сотрудник, лаборатория
геоморфологии
Институт географии им. В. Б. Сочавы СО
РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 1
e-mail: olek22@mail.ru

Information about the authors

Opekunova Marina Yurievna
Candidate of Sciences (Geography),
Senior Research Scientist, Laboratory of
Geomorphology
V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS
1, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
Senior Researcher, Siberian School of
Geosciences
Irkutsk National Research Technical University
83, Lermontov st., Irkutsk, 664074,
Russian Federation
e-mail: opek@mail.ru

Bardash Alexander Vladimirovich
Candidate of Sciences (Geography),
Research Scientist, Laboratory of
Geomorphology
V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS
1, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: olek22@mail.ru