



Серия «Науки о Земле»
2024. Т. 50. С. 3–16
Онлайн-доступ к журналу:
<http://izvestiageo.isu.ru/ru>

ИЗВЕСТИЯ
Иркутского
государственного
университета

Научная статья

УДК 911:551.4:528.92.23(282.256.341.1)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.50.3>

Геоморфометрический анализ цифровой модели рельефа Верхнеангарской котловины для выявления и оценки опасных гравитационных процессов

Т. А. Борисова, А. Н. Бешенцев, С. А. Петров*

Байкальский институт природопользования СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

Аннотация. Представлены результаты комплексного геоморфологического анализа типов рельефа Верхнеангарской котловины (бассейн оз. Байкал) для геоинформационной диагностики опасных гравитационных процессов. Дана физико-географическая характеристика исследуемой территории, обозначены тектонические и геологические особенности формирования рельефа. Для метрической оценки и последующего картографирования рельефа в программной среде ArcGIS на базе изолиний и отметок высот топографической основы масштаба 1:100 000 создана цифровая модель рельефа исследуемой территории и растровые покрытия морфометрических параметров уклона и экспозиции. Для геоморфометрического анализа модели рельефа выбраны пять репрезентативных полигонов, характеризующих схожие типы рельефа сводово-глыбовых гор и обладающие одинаковыми физико-географическими условиями для формирования и развития гравитационных процессов. Для визуализации каждого полигона выполнено картографирование уклона и экспозиции склонов, а также представлен космический снимок. В процессе анализа и геоморфологического дешифрирования репрезентативных полигонов установлены планово-высотные метрические параметры типов рельефа со схожими морфометрическими характеристиками, способствующие формированию и развитию опасных гравитационных процессов и определяющие условия и риски хозяйственной деятельности на горных территориях: высокогорный эрозионно-экзарационный, высокогорный денудационно-эрозионный, среднегорный эрозионно-денудационный, среднегорный денудационно-эрозионный, низкогорный денудационный.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, типы рельефа, опасные гравитационные процессы, геоморфологический анализ

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00261, <https://rscf.ru/en/project/23-27-00261/>.

Для цитирования: Борисова Т. А., Бешенцев А. Н., Петров С. А. Геоморфометрический анализ цифровой модели рельефа Верхнеангарской котловины для выявления и оценки опасных гравитационных процессов // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2024. Т. 50. С. 3–16. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.50.3>

Original article

Geomorphometric Analysis of Digital Elevation Model of the Verkhneangarskaya Basin for Identifying and Assessing Dangerous Gravitational Processes

T. A. Borisova, A. N. Beshentsev, S. A. Petrov*

Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation

© Борисова Т. А., Бешенцев А. Н., Петров С. А., 2024

* Полные сведения об авторах см. на последней странице статьи.

For complete information about the authors, see the last page of the article.

Abstract. The article presents the results of a comprehensive geomorphological analysis of the relief types of the Verkhneangarskaya depression (Lake Baikal basin) for geoinformation diagnostics of dangerous gravitational processes. The physical and geographical characteristics of the study area are given, tectonic and geological features of relief formation are designated. For metric assessment and subsequent mapping of the relief in the ArcGIS software environment, a digital elevation model (DEM) of the study area and raster coverages of morphometric parameters of slope and aspect were created on the basis of isolines and elevation marks of the topographic base at a scale of 1:100 000. For geomorphometric analysis of the relief model, five representative polygons were selected that characterize similar relief types of arched-block mountains and have the same physical and geographical conditions for the formation and development of gravitational processes. To visualize each polygon, slope and aspect mapping was performed, and a space image was presented. In the process of analysis and geomorphological interpretation of representative polygons, the planned-altitude metric parameters of relief types with similar morphometric characteristics were established, contributing to the formation and development of dangerous gravitational processes and determining the conditions and risks of economic activity in mountainous areas: high-mountain erosion-exaration, high-mountain denudation-erosion, mid-mountain erosion-denudation, mid-mountain denudation-erosion, low-mountain denudation.

Keywords: digital elevation model, relief types, dangerous gravitational processes, geomorphometric analysis.

For citation: Borisova T.A., Beshentsev A.N., Petrov S.A. Geomorphometric Analysis of Digital Elevation Model of the Verkhneangarskaya Basin for Identifying and Assessing Dangerous Gravitational Processes. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2024, vol. 50, pp. 3-16. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.50.3> (in Russian)

Введение

В современных условиях возрастающего транзитного значения бассейна оз. Байкал и активизации усилий государства по формированию новых логистических и минерально-сырьевых кластеров на его территории оценка потенциальной вероятности геоморфологической опасности в горных районах северной части бассейна является важным исследовательским направлением. Осуществление хозяйственной деятельности в северных регионах Российской Федерации сталкивается с трудностями в силу недостаточности объективной геопространственной информации об опасных природных процессах [Абросимов, Сизов, 2013]. Это связано с труднодоступностью и слабой изученностью территории [Борисова, 2013]. Однако использование спутниковых материалов и ортофотопланов беспилотных летательных аппаратов на базе геoinформационной технологии обеспечивает широкие возможности цифрового моделирования и визуализации таких территорий.

Интенсивность и пространственно-временная направленность опасных гравитационных процессов (ОГП) обусловлены рядом определяющих их природных и природно-антропогенных факторов и в первую очередь рельефом территории как совокупностью неровностей земной поверхности разных размеров, измеряемых относительно различных базисных уровней, важнейшим из которых является эквипотенциальная поверхность гравитационного поля [Трегуб, Жаворонкин, 2000]. Рельеф определяет предпосылки латерального переноса воды и обломочного вещества по земной поверхности под действием гравитации [Kirkby, Chorley, 1967; Speight, 1974], а также литодинамических потоков, образуя зоны денудации (сноса) и скопления в зонах аккумуляции осадочного материала [Ковда, Зонн, 1985; Martz, de Jong,

1988]. Соответственно, наиболее динамичными являются гравитационные процессы, которые развиваются на горных территориях на крутых склонах (процессы обваливания, осыпания, сползания и др). Направление распространения потока в целом, зоны возможного смыва, транзита и накопления обломочного материала и различных веществ определяются морфоэлементами рельефа.

С другой стороны, рассматривая рельеф в связи с жизнедеятельностью человека при оценке потенциальной опасности территории для природопользования, рельеф и его отдельные формы проявляют себя как непосредственные «затруднители» хозяйственной деятельности; как осложняющее обстоятельство в жизни человека; как «провокатор» опасных процессов; как распределитель опасных процессов в пространстве и во времени [Рельеф среды жизни ... , 2002; Кузьмин, 2009].

Выделение и точную оценку планово-высотных параметров типов рельефа на земной поверхности обеспечит геоморфометрический анализ [Pike, 2000; Geomorphometry in mountain ... , 2004; Geomorphometry: Concepts, Software ... , 2008; Florinsky, 2016], который является эффективным методом при определении степени влияния рельефа на функционирование геосистем. Геоморфометрический анализ рельефа на основе цифровых моделей рельефа (ЦМР) является важной частью современных геоэкологических исследований в силу доступности исходного материала, объективности количественных методов расчета и единовременной обзорности значительных территорий [Глейзер и др., 2006]. Выделяют четыре группы геоморфометрических параметров: геометрические, гидрологические, топографо-микrokлиматические, вертикальная дифференциация природной среды [Готов, 2013]. В данном исследовании мы будем опираться на геометрические параметры рельефа, отображающие особенности морфологии территории и определяющие скорость и интенсивность потоков вещества и энергии, а также динамику склоновых процессов. К ним относятся высотная дифференциация, уклон и экспозиция склонов.

Цель данного исследования заключается в установлении границ и оценке метрических параметров типов рельефа, способствующих формированию и развитию опасных гравитационных процессов и определяющих условия опасности территории и уровня риска для хозяйственной деятельности.

Характеристика объекта исследования

Для исследования выбран участок в северной части бассейна оз. Байкал – средняя часть бассейна р. Верхней Ангары. В целом территория имеет сложную историю развития рельефа. Занимает часть Кичеро-Мамского антиклинория и Ангарского синклинория. В строении антиклинория принимают участие породы нижнепротерозойского структурного яруса, на котором в грабене залегают наиболее древние горизонты нижнего кембрия. Ангарский синклинорий сложен породами нижнеполеозойского складчатого яруса, залегающего на нижнепротерозойском основании. Для геоморфометрического

анализа выбраны пять репрезентативных полигонов (площадь полигона 72 км²), характеризующих схожие типы рельефа.

В формировании крупных орографических элементов территории ведущая роль принадлежит новейшим тектоническим движениям, определившим сводовое поднятие, заложение и развитие межгорной впадины, охватывающее два периода оледенения горно-долинного типа. В зависимости от эндогенных (тектонических движений) и экзогенных факторов сформирован современный ландшафт с развитием на нем процессов эрозии, экзарации, плоскостной денудации и аккумуляции и др. По преобладающему развитию скульптурных и аккумулятивных форм выделяются два типа основного рельефа: сводово-глыбовые горы активизированных древних подвижных поясов и аккумулятивные равнины.

Верхнеангарская котловина Байкальской рифтовой зоны (восточная часть) имеет вытянутую форму с овальными контурами, простирается с северо-востока на юго-запад. Днище впадины лежит на высоте 500–663,5 м, минимальные отметки тяготеют к северному борту. Общая площадь впадины 3800 км²; коэффициент формы (отношение ее длины к ширине) составляет 3,8; средняя относительная высота бортов 1950 м. По морфогенетическому признаку выделяются наклонные аллювиально-пролювиальные, плоские террасированные аллювиальные, плоские озерно-аллювиальные основные типы рельефа. На участках, подвергавшихся интенсивному рельефообразующему воздействию ледников, распространены холмисто-западинный и грядово-увалистый рельефы. Элементы рельефа обусловлены развитием флювиальных, гляциальных, озерных и отчасти эоловых процессов, а также современных водно-эрозионных, криогенных и др. [Выркин, 2018]. Днище впадины заполнено мощной толщей рыхлых отложений (аллювиальных, аллювиально-озерных и ледниковых).

Водораздельная линия бассейна на западе и северо-западе проходит по Делюну-Уранскому и Верхнеангарскому хребтам. На юге и юго-востоке – по Северо-Муйскому хребту. Преобладающая высота гор составляет 1300–1800 м, отдельные вершины достигают более 2600 м. Широкий диапазон горных вершин и отчасти предопределенное этим неодинаковое развитие денудационных процессов обуславливают разнообразие рельефа. Горные хребты имеют складчатый характер со множеством остроконечных, пикообразных, гольцовых вершин. Повсеместно встречаются следы оледенения, с которыми связано образование каровых озер. Наряду с острогребневыми хребтами наблюдаются пологосводчатые, плосковершинные, среди которых имеют место скальные останцы. Сложены преимущественно кислыми породами: мелко среднезернистыми, иногда порфировидными гранитами, амфиболовыми гранитами, сиенитами. Подчиненное распространение имеют габбро, габбро-диориты и диориты. Также ограничено распространены кристаллические сланцы, песчаники, гравелиты, известняки.

Материалы и методы исследований

Для визуализации рельефа местности и последующей геоинформационной диагностики формирования и развития ОГП надежным и высокоточным виртуальным аналогом является ЦМР исследуемой территории – трехмерная математическая модель высотных отметок земной поверхности. Согласно ГОСТ Р 59562-2021¹ ЦМР представляет собой файл или набор данных, содержащий пространственные координаты множества точек земной поверхности в определенной системе отсчета или определенную форму представления и структурного описания исходных данных, позволяющий вычислять (восстанавливать) объект путем интерполяции, аппроксимации или экстраполяции [Новаковский, Прасолов, Прасолова, 2003]. Таким образом, под ЦМР мы понимаем растровое покрытие как особую форму организации исходных метрических данных в виде растровых ячеек (пикселей), локализованное в геоинформационном поле по правилам используемой картографической проекции, регистрирующее в каждой ячейке метрическое значение высоты земной поверхности над уровнем моря.

В данном проекте для создания ЦМР бассейна р. Верхней Ангары использовались векторные слои горизонталей (высота сечения рельефа 20 м), отметок высот и урезов воды топографической основы масштаба 1:100 000 КБ «Панорама» (рис. 1).

Векторные слои и grid-покрытие ЦМР (пространственное разрешение пиксела 10 м) локализованы в системе геодезических координат WGS-84. В результате создана математическая модель скалярного геополя, описывающая пространственное распределение высоты (z) в зависимости от координат земной поверхности (x , y). Для расчета морфометрических параметров рельефа уклона и экспозиции ЦМР позволяет выполнить оценку окружения пиксела и количественно описать связь между соседними пикселями (размер пиксела 10×10 м). Для создания производных покрытий и расчета морфометрических параметров уклона и экспозиции в ArcGIS использован алгоритм Zevenbergen – Thorne [Zevenbergen, Thorne, 1987], эффективность и достоверность которого подтверждены другими исследованиями [Skidmore, 1989; Zhou, Liu, 2004].

Уклон рельефа представляет собой угол наклона в точке пересечения между горизонтальной плоскостью и плоскостью, касательной к земной поверхности, измеряется в градусах, процентах или радианах. Простота расчета и информативность делают угол наклона наиболее используемым показателем в моделировании процессов перераспределения геологического материала на земной поверхности. Именно уклон поверхности определяет локальную интенсивность проявления ОГП и характеризует важные процессы в природных ландшафтах: поверхностный сток и дренирование, эрозию, мощность почвенного профиля, а также особенности растительного покрова участка.

¹ ГОСТ Р 59562-2021. Съемка аэрофототопографическая. Технические требования. М. : Стандартинформ, 2021. 66 с.

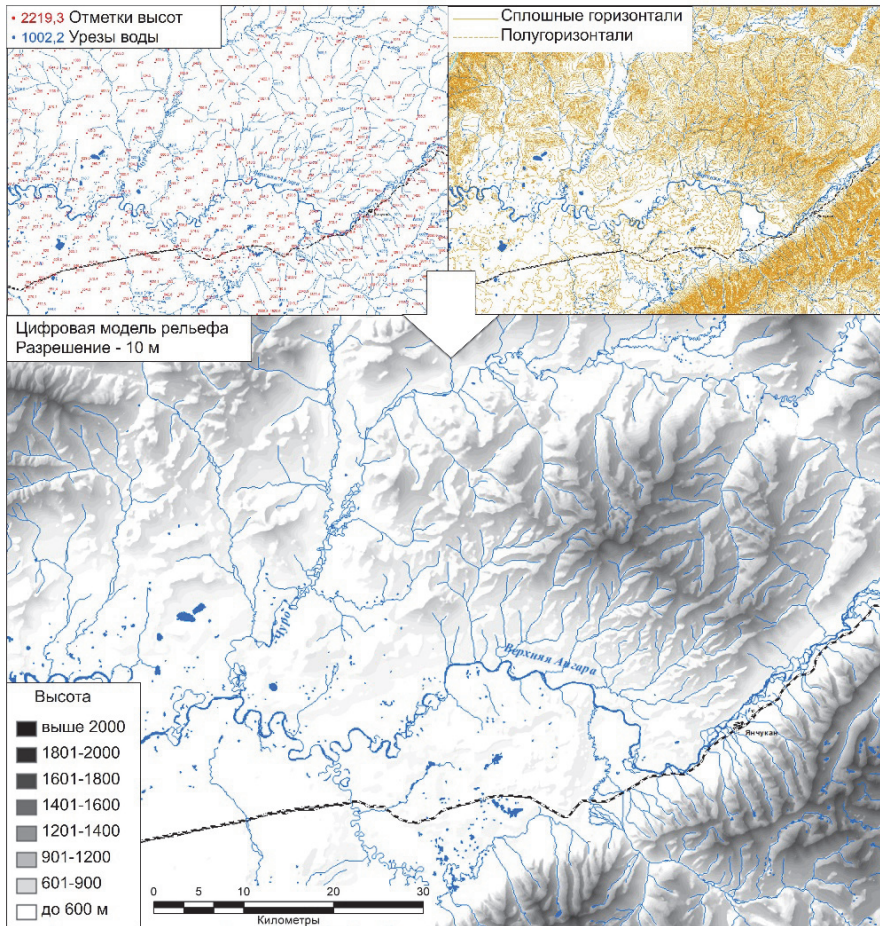


Рис. 1. Цифровая модель рельефа Верхнеангарской котловины (фрагмент)

Экспозиция рельефа представляет собой угол по часовой стрелке (азимут) между направлением на север и проекцией уклона на горизонтальную плоскость, характеризует ориентацию участка по отношению к потоку солнечных лучей и определяет количество радиации, получаемой земной поверхностью. Большинство эколого-геохимических процессов зависит от поступления в каждую точку поверхности влаги и солнечной энергии, их перераспределение регулируется крутизной и ориентацией склонов. Благодаря этому экспозиция существенно влияет на локальный климат участка. Количество солнечной радиации непосредственно определяет теплообеспеченность склонов и, как следствие, особенности протекания здесь эрозионных процессов [Киркби, Митчел, Бубензер, 1984].

Основной аналитической процедурой исследования является геоморфологическое дешифрирование, позволяющее извлечь метрические геоданные и экспертную геоморфологическую информацию из материалов дистанционного зондирования Земли. Геоморфологическое дешифрирование снимков

Landsat обеспечило выявление морфологических особенностей рельефа и его типизацию в границах исследуемой территории, уточнение характера склонов, индикацию склоновых процессов, заверку границ возможного формирования и развития гравитационных процессов (рис. 2).

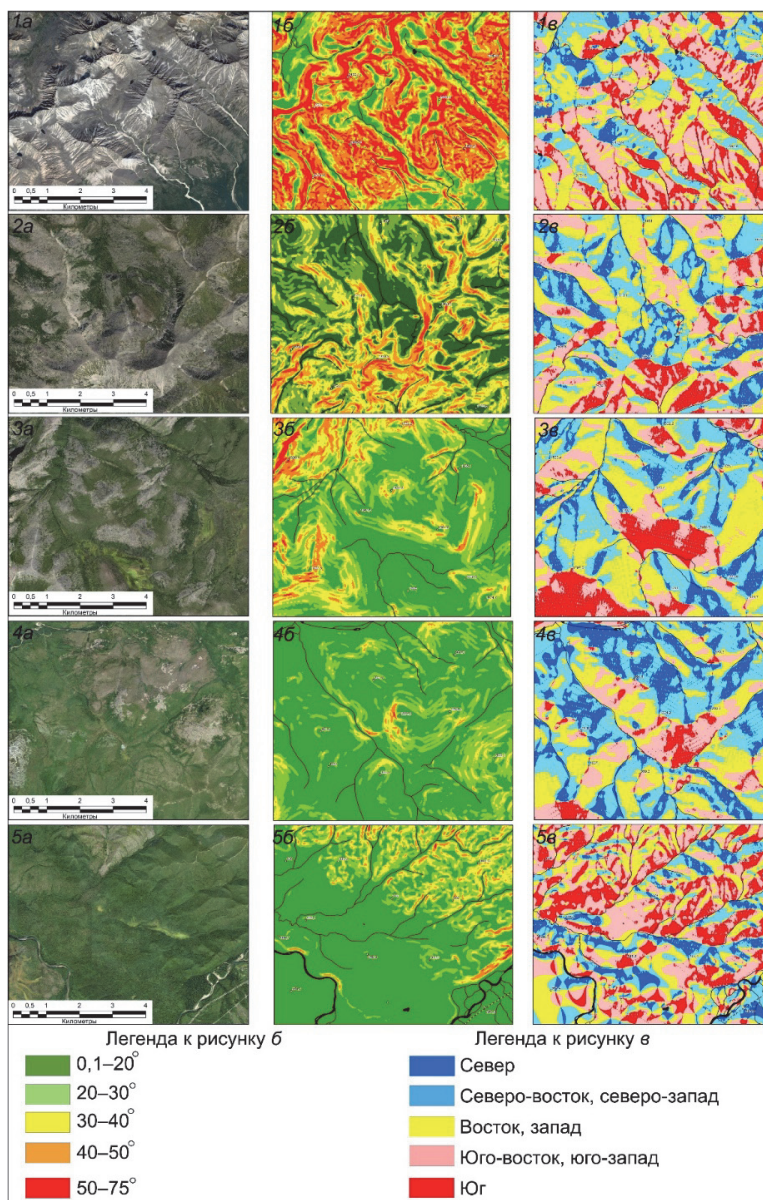


Рис. 2. Картографическая визуализация типов рельефа: 1 – высокогорный эрозионно-экзарационный; 2 – высокогорный денудационно-эрозионный; 3 – среднегорный эрозионно-денудационный; 4 – среднегорный денудационно-эрозионный; 5 – низкогорный денудационный; а – спутниковый снимок Landsat, б – уклон рельефа по ЦМР, в – экспозиция склонов по ЦМР

Обсуждение результатов

Для диагностики формирования и развития ОГП или их активизации установлены определяющие группы геоморфологических факторов в системе их взаимосвязи и генетическом взаимоотношении. Влияние рельефа проявляется через его генетические показатели, морфологические и морфометрические характеристики. При выделении типов горного рельефа рассмотрены в первую очередь специфичные морфогенетические особенности территории в целом и его отдельных хребтов. В результате анализа ЦМР определены морфометрические показатели высоты, глубины и густоты расчленения, углов наклона, экспозиции склонов, форм микрорельефа, что позволило получить достоверную и полную информацию возможностей формирования и развития склоновых процессов.

В процессе комплексного геоморфологического анализа репрезентативных полигонов (см. рис. 2) сводово-глыбовых гор установлены планово-высотные параметры типов рельефа, обладающих характерными формами и элементами рельефа, определенными морфометрическими характеристиками с предопределяющими факторами формирования и развития опасных гравитационных процессов: высокогорный эрозионно-экзарационный, высокогорный денудационно-эрозионный, среднегорный эрозионно-денудационный, среднегорный денудационно-эрозионный, низкогорный денудационный.

Высокогорный эрозионно-экзарационный тип рельефа характерен для осевой части Верхнеангарского хребта и Северо-Муйского хребта (р. Янчуй). Основными формами рельефа являются острогребневые хребты, пикообразные вершины, кары, цирки, трог, висячие боковые долины, ледниковые озера. Здесь отмечаются максимальные относительные превышения (1000–1400 м) и наибольшая интенсивность рельефообразования. Вершины представляют собой пирамидальные пики со слабо вогнутыми гранями. Абсолютные отметки составляют 1800–2200 м. Глубина расчленения более 1000–1200 м (см. рис. 2, 1б). Склоны скалистые с сейсмогенной моделировкой, занимают по площади более 80 % территории. Преобладающая крутизна склонов составляет выше 40–50°, максимальная достигает более 70°. Склоны разной крутизны (от крутых до относительно отлогих) присущи для участков троговых долин с плоским хорошо выработанным дном и боковыми долинами, а также на участках современных горных речных долин с реликтами ледниковых форм рельефа. Склоны междуречий в верхней части крутые и скалистые, а внизу вогнутые, переходящие в плоское днище трога (см. рис. 2, 1а).

В верхних частях крутых склонов наблюдается наличие стенок и ниш, в местах седловин и подножий – скопление коллювия. Конусы осыпей наиболее характерны для склонов южной экспозиции, образуя у подножия сплошную систему башен. Более 50 % склонов подвержены обвально-осыпным процессам, также имеются определяющие условия для лавино- и селеобразования (микросели) – движения водных и снежных масс по склонам троговых долин. Сильная расчлененность, большие значения относительных превышений, высокая крутизна склонов, скалистость, а также интенсивные современные неотектонические подвижки и активные дизъюнктивные дислокации создают условия для широкого проявления экстремальных ОГП с высокой степенью вероятности проявления.

Высокогорный денудационно-эрозионный тип рельефа наблюдается на участке, примыкающем к области эрозионно-экзарационного рельефа Верхнеангарского хребта, на участках междуречья р. Янчукан Северо-Муйского и Делюн-Уранского хребтов. Представляет собой пологосводчатые или острогребневые хребты, ледниковые долины и кары с V-образными долинами и паадьми. Максимальная отметка высоты 1993 м, глубина расчленения 700–900 м. Хребты и их отроги имеют широкие округлые или закругленные узкие гребни, острогребневые отроги имеют более плавный продольный профиль гребневой линии. Кары находятся в стадии разрушения, стенки их выполаживаются и расчленяются (см. рис. 2, 2а).

Склоны вверху горных массивов имеют выпуклый профиль и меньшую крутизну до 20°. Пологие склоны частично покрыты крупным обломочным материалом и останцами коренных пород, образуя местами каменные россыпи, а в ложбинах – небольшие каменные реки. Профиль средней части склонов крутой и прямой, в отдельных местах в нижней части вогнутый. Крутизна склонов различна: преобладает 20–40° на площади около 55 %. Крутые скалистые склоны выделяются на участках острогребневых хребтов крутизной 40–50°, иногда достигающей до 70° (см. рис. 2, 2б). Вдоль горных долин в приустьевых частях отмечаются интенсивные эрозионные врезы глубиной 100–200 м с присутствием отвесных участков. На обрывистых нависающих склонах типично развитие обвальных процессов, на более пологих (осыпных и отчасти флювиальных процессах, что подтверждается наличием осыпных лотков, шлейфов) – зон накопления обвально-осыпного материала, а также конусов выноса. Более высокая интенсивность развития экзогенных геологических процессов прослеживается на склонах южных экспозиций. Северные склоны в большей степени залесены (см. рис. 2, 2а, 2в).

Условия для формирования гравитационных процессов (обвально-осыпных, движения курумов, лавино- и селеобразования) оцениваются как весьма благоприятные с высокой степенью возможности их проявлений.

Среднегорный эрозионно-денудационный тип рельефа выделяется в среднем течении рек Янчуя и Янчукана Северо-Муйского хребта, в верховьях р. Аявкана Верхнеангарского хребта и междуречья р. Сарга – р. Верхней Ангары Делюн-Уранского хребта. Полосводчатые, плосковершинные и острогребневые отроги и массивы, разветвленная сеть небольших широких долин, часто осложненных эрозионными распадками. В отдельных местах сохранены реликты ледниковой скульптуры (стенки каров и трогов). Острогребенчатый рельеф характерен для отдельных небольших горных массивов, радикально расчлененных короткими V-образными долинами. Пологоступенчатые и плосковершинные отроги небольшой протяженности покрыты курумами, среди которых выступают скальные останцы. Занимаемая площадь составляет около 30 %. Максимальная отметка высоты 1775 м, глубина расчленения 700 м. Наряду с широкими долинами с плоским или слабо вогнутым днищем часто встречаются короткие V-образные долины и пади, у нижних окончаний которых формируются конусы выноса (см. рис. 2, 3а).

Склоны разнообразны даже в пределах одного массива или отрога: пологие и крутые, прямые вогнутые и выпуклые. Крутизна варьирует от 15 до более 50°, преобладающая – 20–30°. Поверхность пологих склонов преимущественно покрыта останцами коренных пород или курумами. Грубый обломочный материал, двигаясь по склонам, скапливается в лощинах и ложбинах, образуя в отдельных местах так называемые каменные реки. Северные и восточные склоны преимущественно залесены, однако по поверхности также отмечаются площадные и линейно вытянутые курумы (см. рис. 2, 3а). Относительно пологие склоны характеризуются больше как денудационные с медленным, но при сильных землетрясениях возможно и моментальным, переносом материала денудации. В рельефе отмечаются характерные борозды и смещение продуктов сноса обломочного материала к подножию склонов. В нижних частях отдельных крутых склонов и уступов фиксируются обвальнo-осыпные зоны.

Анализ морфометрических характеристик данного типа рельефа свидетельствует о преобладании денудационных процессов: движения курумов; на крутых склонах – обвальнo-осыпных. В соответствии с обозначенными морфометрическими показателями при условиях значительных снегозапасов зимой и прохождения продолжительных дождей в теплый период имеются большие предпосылки для формирования нивально- и водно-гравитационных явлений.

Среднегорный денудационно-эрозионный тип рельефа с характерными формами острогребневых отрогов с пилообразными и узкими, радиально расчлененными массивами и густой сетью коротких V-образных долин и падей отмечается на участках южного обрамления Верхнеангарской депрессии (западнее р. Янчуя) и южных склонов Делюн-Уранского хребта. Максимальные отметки высот 1500–1700 м. Глубина эрозионного вреза составляет 700–750 м. Долины почти лишены аллювия – короткие с узкими днищами (см. рис. 2, 4а).

Склоны имеют прямой или выпуклый профиль, неровную изрезанную поверхность. Преобладающая крутизна склонов – до 20°. В целом большей частью покрыты растительностью, залесены. В верхних частях пологие с наличием каменных полей и открытых выходов коренных пород. Крутизна их небольшая, в отдельных местах до 30°. В части острогребневых отрогов и V-образных долин – в среднем 40–50°, в отдельных местах узких долин и падей склоны крутые скалистые, крутизной, достигающей более 50°. Значительная крутизна склонов прослеживается вдоль долин и на отрогах хребта (см. рис. 2, 4б).

Данный тип рельефа с его морфологическими особенностями склонов и морфометрическими показателями обладает набором условий на участках долин и отрогов для возникновения осыпных, реже обвальных и флювиальных процессов. Площадь поражения не превышает 9 %. Наиболее опасным явлением с высокой вероятностью прохождения в период циклонов и высокой сейсмичности являются катастрофические водо-каменные сели.

Низкогорный денудационный тип рельефа характеризуется несколько вытянутыми массивами с куполообразными вершинами, пологовершинными и полосводчатыми отрогами, разделенными широкими долинами. Наблюдается на периферических частях горных хребтов и межгорных котловин. Абсолютные высоты не превышают 1200 м, относительные составляют 400–500 м (см. рис. 2, 5б). Склоны в верхней части имеют выпуклый профиль и крутизну в среднем до 10–20°, в нижней – вогнутый, отдельных отрогов крутые – 20–30° и даже более, преимущественно покрыты растительностью. Осыпного сноса не прослеживается. Данный вид склонов типично денудационный – медленного перемещения обломочного материала по склону.

Для данных склонов характерны процессы медленной денудации к подножию, а в широких низовьях горных рек – типичные формы флювиальных процессов. Данные участки рек являются транзитами переноса селей. Сформированный в высокогорье водо-каменный поток переносится вниз по склону, и нередко разгрузкой его являются низовья горных рек, что подтверждается разветвленностью русла или конусами выноса (см. рис. 2, 5а).

В результате экспертной экстраполяции выполнена дифференциация территории котловины по типам горного рельефа и установлены их точные плано-высотные границы (рис. 3).

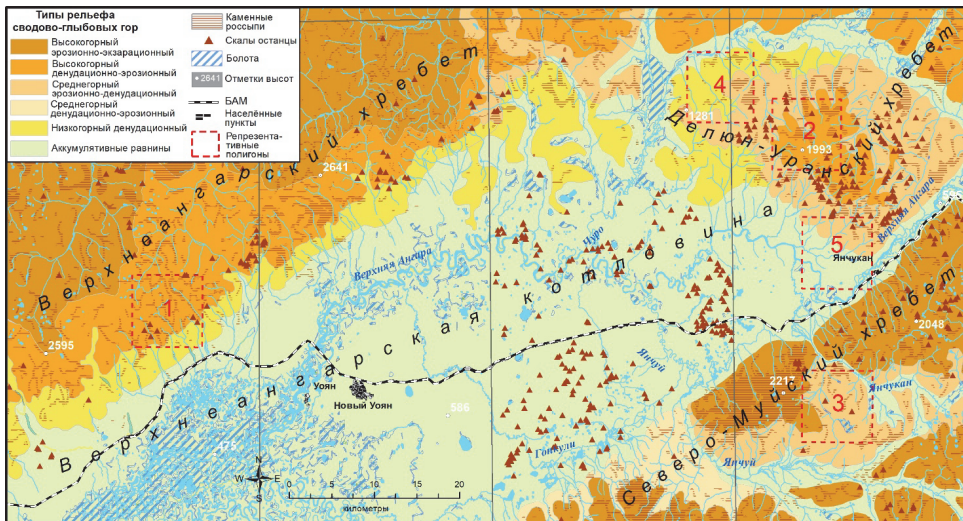


Рис. 3. Карта типов горного рельефа Верхнеангарской котловины

Выводы

В результате геоморфометрического анализа ЦМР определены границы и метрические параметры типов горного рельефа Верхнеангарской котловины, определяющие формирование и развитие ОГП. Установлено, что морфогенетические особенности типов рельефа обуславливают разнообразие склонов, создающих многообразие условий для формирования и развития определенного набора ОГП в первую очередь водно-гравитационных и нивально-

гравитационных. Наиболее благоприятными условиями для развития ОГП являются высокие горы с глубоким расчленением, крутыми склонами, в районе интенсивных неотектонических движений и активных глубинных разломов.

В результате геоморфологического дешифрирования и анализа ЦМР выделены участки с разной степенью интенсивности и распространенности гравитационных процессов. Наиболее опасны участки высокогорья со скалистыми склонами более 50–60° с крутыми уступами; опасны участки высокогорья и среднегорья со скалистыми склонами с крутизной более 30–40°, мало опасны участки среднегорья и низкогорья со склонами крутизной до 20–30°.

Применение геоинформационной технологии при параметризации типов рельефа способствовало автоматизации операций геоморфометрического анализа, уменьшению трудозатрат, снижению субъективизма экспертных решений, а также обеспечило свободное масштабирование территории и интерактивное редактирование создаваемых картографических материалов.

Список литературы

Абросимов А. В., Сизов О. С. Геопространственное дистанционное обеспечение предотвращения рисков, связанных с термоэрозией в условиях Крайнего Севера // *Геопрофи.* 2013. № 6. С. 10–14.

Борисова Т. А. Природно-антропогенные риски в бассейне озера Байкал. Новосибирск : Гео, 2013. 126 с.

Выркин В. Б. Рельеф и экзогенные процессы Окинской котловины (Восточный Саян) // *Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле.* 2018. Т. 23. С. 43–50.

Глейзер И. В., Копанева И. М., Рублева Е. А. Некоторые аспекты использования ГИС-технологий при морфометрическом анализе рельефа // *Вестник Удмуртского университета.* 2006. № 11. С. 143–146.

Глотов А. А. Использование ЦМР для задач рационального природопользования и мониторинга природных процессов // *Управление развитием территории.* 2013. № 2. С. 39–41.

Киркби М. Дж., Митчел Дж. К., Бубензер Г. Д. Эрозия почвы / пер., авт. предисл. М. Ф. Пушкарев. М. : Колос, 1984. 415 с.

Ковда В. А., Зонн С. В. Биогеохимия почвенного покрова. М. : Наука, 1985. 262 с.

Кузьмин С. Б. Опасные геоморфологические процессы и риск природопользования. Новосибирск : Гео, 2009. 195 с.

Новаковский Б. А., Прасолов С. В., Прасолова А. И. Цифровые модели рельефа реальных и абстрактных геополей. М. : Научный мир, 2003. 61 с.

Рельеф среды жизни человека. М. : Медиа-Пресс, 2002. 640 с.

Трегуб А. И., Жаворонкин О. В. Морфометрия современной поверхности и неотектоническая структура территории ВКМ // *Вестник Воронежского университета. Серия: Геология.* 2000. Вып. 9. С. 19–26.

Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science / eds.: Hengl T., Reuter H. I. Elsevier Publ., 2008. Vol. 33. 772 p.

Florinsky I. V. Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology. Amsterdam : Elsevier publ., 2016. 486 p.

Kirkby M. J., Chorley R. J. Throughflow, overland flow and erosion // *Internat. Assoc. Sci. Hydrology Bull., 1967. Vol. 12, N 3. P. 5–21.*

Martz L. W., de Jong E. A FORTRAN program for measuring catchment area from digital elevation models // *Computer and Geosciences.* 1988. Vol. 14, N 5. P. 627–640.

Pike R. J. Geomorphometry – Diversity in quantitative surface analysis // *Progress in Physical Geography.* 2000. Vol. 24. P. 1–20.

Geomorphometry in mountain terrain / S. Rasemann, J. Schmidt, L. Schrott, R. Dikau // *Geographic Information Science and Mountain Geomorphology* / eds. Bishop M., Shroder J. Springer Publ., 2004. P. 101-146.

Skidmore A. A. Comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model // *International Journal of Geographical Information Systems*. 1989. Vol. 3, N 4. P. 323–334.

Speight J. G. A parametric approach to landform regions. *Progress in Geomorphology*. London : Institute of British Geographers, 1974. P. 213–230.

Zevenbergen L. W., Thorne C. R. Quantitative Analysis of Land Surface Topography // *Earth Surface Processes and Landforms*, 1987. Vol. 12, N 1. P. 47–56.

Zhou Q., Liu X. Error Analysis on Grid-Based Slope and Aspect Algorithms // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2004. Vol. 70, N 8. P. 957–962.

References

Abrosimov A.V., Sizov O.S. Geoprostranstvennoye distantsionnoye obespecheniye predotvrazhcheniya riskov, svyazannykh s termoeroziyey v usloviyakh Kraynego Severa [Geospatial remote support for preventing risks associated with thermoerosion in the Far North]. *Geoprofi* [Geoprofi], 2013, no. 6, pp. 10-14. (in Russian)

Borisova T.A. *Prirodno-antropogennyye riski v bassejne ozera Baykal*. [Natural and anthropogenic risks in the Lake Baikal basin]. Novosibirsk, Geo Publ., 2013, 126 p. (in Russian)

Vyrkin V.B. Relyef i ekzogennyye protsessy Okinskoy kotloviny (Vostochnyy Sayan) [Relief and exogenous processes of the Oka Basin (Eastern Sayan)]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle* [The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences], 2018, no. 23. pp. 43-50. (in Russian)

Glazer I.V., Kopaneva I.M., Rubleva E.A. Nekotoryye aspekty ispolzovaniya GIS-tekhnologiy pri morfometricheskom analize relyefa [Some aspects of the use of GIS technologies in morphometric analysis of relief]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta* [Bulletin of the Udmurt University], 2006, no 11, pp. 143-146. (in Russian)

Glotov A.A. Ispolzovaniye TSMR dlya zadach ratsionalnogo prirodopolzovaniya i monitoringa prirodnykh protsessov [Using DEM for problems of rational environmental management and monitoring of natural processes]. *Upravleniye razvitiyem territorii* [Management of territory development], 2013, no. 2, pp. 39-41. (in Russian)

Kirkby M.J., Mitchell J.C., Bubenzer G.D. *Eroziya pochvu* [Earth erosion]. Moscow, Kolos Publ., 1984. 415 p. (in Russian)

Kovda V.A., Zonn S.V. *Biogeokhimiya pochvennogo pokrova* [Biogeochemistry of soil cover]. Moscow, Nauka Publ, 1985, 262 p. (in Russian)

Kuzmin S.B. *Opasnyye geomorfologicheskiye protsessy i risk prirodopol'zovaniya* [Hazardous geomorphological processes and environmental management risks]. Novosibirsk, Geo Publ., 2009, 195 p. (in Russian)

Novakovskiy B.A. Prasolov S.V., Prasolova A.I. *Tsifrovyye modeli relyefa realnykh i abstraktnykh geopoley* [Digital relief models of real and abstract geofields]. Moscow, Scientific world Publ., 2003, 61 p. (in Russian)

Rel'yef sredey zhizni cheloveka [Relief of the human living environment]. Moscow, Media-Press, 2002. 640 p. (in Russian)

Tregub A.I., Zhavoronkin O.V. Morfometriya sovremennoy poverkhnosti i neotektonicheskaya struktura territorii [Morphometry of the modern surface and neotectonic structure of the VKM territory]. *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Ser. geology* [Bulletin of the Voronezh University, Series Geology], no. 9, pp. 19-26. (in Russian)

Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science. Ed. by Hengl T., Reuter H.I. Elsevier Publ., 2008, vol. 33, 772 p.

Florinsky I.V. *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*. Amsterdam, Elsevier publ., 2016, 486 p.

Kirkby M.J., Chorley R.J. Throughflow, overland flow and erosion. *Internat. Assoc. Sci. Hydrology Bull.*, 1967, vol. 12, no. 3, pp. 5-21.

Martz L. W., de Jong, E. A FORTRAN program for measuring catchment area from digital elevation models. *Computer and Geosciences*, 1988, vol. 14, no. 5, pp. 627-640.

Pike R.J. Geomorphometry – Diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography*, 2000, vol. 24, pp. 1-20.

Rasemann S., Schmidt J., Schrott L., Dikau R. Geomorphometry in mountain terrain. *Geographic Information Science and Mountain Geomorphology*. Bishop M., Shroder J. (eds.), Springer Publ., 2004. pp. 101-146.

Skidmore A.A. Comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1989, vol. 3, no. 4, pp. 323-334.

Speight J.G. A parametric approach to landform regions. *Progress in Geomorphology*, 1974, vol. 7, pp. 213-230.

Zevenbergen L.W., Thorne C.R. Quantitative Analysis of Land Surface Topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1987, vol. 12, no. 1, pp. 47-56.

Zhou Q., Liu X. Error Analysis on Grid-Based Slope and Aspect Algorithms. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2004, vol. 70, no. 8, pp. 957-962.

Сведения об авторах

Борисова Татьяна Анатольевна

кандидат географических наук,
старший научный сотрудник
Байкальский институт природопользования
СО РАН
Россия, 670042, г. Улан-Удэ, Сахьяновой, 8
e-mail: tabor@binm.ru

Бешенцев Андрей Николаевич

доктор географических наук,
заведующий лабораторией
Байкальский институт природопользования
СО РАН
670042, г. Улан-Удэ, Сахьяновой, 8
e-mail: abesh@binm.ru

Петров Сергей Алексеевич

инженер
Байкальский институт природопользования
СО РАН
Россия, 670042, г. Улан-Удэ, Сахьяновой, 8
e-mail: sergei_petrov13@mail.ru

Information about the authors

Borisova Tatyana Anatolyevna

Candidate of Sciences (Geography),
Senior Research Scientist
Baikal Institute of Nature Management SB RAS
8, Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670042,
Russian Federation
e-mail: tabor@binm.ru

Beshentsev Andrew Nikolaevich

Doctor of Sciences (Geography),
Head of Laboratory
Baikal Institute of Nature Management SB RAS
8, Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670042,
Russian Federation
e-mail: abesh@binm.ru

Petrov Sergey Alekseevich

Engineer
Baikal Institute of Nature Management SB RAS
8, Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670042,
Russian Federation
e-mail: sergei_petrov13@mail.ru

Код научной специальности: 1.6.14

Статья поступила в редакцию 16.09.2024; одобрена после рецензирования 05.11.2024; принята к публикации 09.12.2024

The article was submitted September, 16, 2024; approved after reviewing November, 05, 2024; accepted for publication December, 09, 2024