

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ SAGA GIS

Петров С.А., Борисова Т.А.,

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

Аннотация. Представлены результаты оценки вероятности формирования опасных гравитационных процессов на горных территориях северной части бассейна оз. Байкал. Для решения этой задачи рассмотрены возможности программного пакета SAGA GIS для обработки цифровых моделей рельефа и данных дистанционного зондирования для картографирования и анализа территории, подверженной опасным гравитационным и эрозионным процессам. На примере Верхнеангарской котловины выполнен геоморфометрический анализ рельефа и определены наиболее эффективные инструменты геопространственной оценки территории для выявления и прогнозирования опасных гравитационных процессов.

Ключевые слова: *SAGA GIS, цифровая модель рельефа, геоморфометрический анализ, эрозия, уклон, топографический индекс влажности, аккумуляция потока, индекс мощности потока, индекс баланса геомасс*

ASSESSMENT OF THE PROBABILITY OF FORMATION OF HAZARDOUS GRAVITATIONAL PROCESSES IN MOUNTAIN TERRITORIES USING SAGA GIS SOFTWARE

S.A. Petrov, T.A. Borisova

FGBUN Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Abstract. The results of assessing the probability of the formation of dangerous gravitational processes in the mountainous areas of the northern part of the lake basin are presented. Baikal. To solve this problem, the capabilities of the SAGA GIS software package for processing digital relief models and remote sensing data for mapping and analyzing territories subject to dangerous gravitational and erosion processes are considered. Using the example of the Upper Angara Basin, a geomorphometric analysis of the relief was performed and the most effective tools for geospatial assessment of the territory for identifying and predicting dangerous gravitational processes were determined.

Keywords: *SAGA GIS, digital elevation model, geomorphometric analysis, erosion, slope, topographic wetness index, flow accumulation, stream power index, mass balance index.*

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 РФ сталкивается с определенными трудностями в силу недостаточности объективной геопространственной информации об опасных природных процессах [1]. Это связано с труднодоступностью и слабой изученностью территории [2].

Интенсивность и пространственно-временная направленность опасных гравитационных процессов (ОГП) обусловлена 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 [7]. Рельеф определяет предпосылки латерального переноса воды и обломочного вещества по земной поверхности под действием гравитации [12, 14], а также литодинамических потоков, образуя зоны денудации (сноса) и скопления в зонах аккумуляции осадочного материала [6, 13]. 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.

Исследование, картографирование и мониторинг влияния рельефа на функционирование геосистем требует широкого использования цифровых моделей рельефа (ЦМР), данных дистанционного зондирования (ДДЗ) и их обработки с помощью современной ГИС-технологии.

Наибольший интерес представляет специализированное программное обеспечение GRASS, ILWIS, SAGA GIS. Преимущество этих программ заключается в их открытом коде и свободном доступе. В данной статье рассматриваются аспекты специализированной обработки ЦМР в среде SAGA GIS. Данная программа автоматизирует и ускоряет расчеты морфометрических показателей, делает возможным выявление и прогнозирование опасных процессов (оползни, обвалы, осыпи) и оценки их воздействия на объекты транспортной и инженерной инфраструктуры (автомобильные и железные дороги, мосты и т.п.) [15].

Характеристика объекта исследования. Объектом исследования является территория Верхнеангарской котловины. Её протяжённость – с юго-запада на северо-восток составляет около 120 км, ширина 40 км, высоты окружающих хребтов от 600 до 2600 м при средних высотах котловины около 800 м. Котловина пересекается Байкало-Амурской магистралью. Здесь находятся населённые пункты Северо-Байкальского района Бурятии — Новый Уоян, Уоян, Кумора, Ангоя.

Днище котловины плоское, заболоченное, с многочисленными озерами, излучинами и протоками р. Верхней Ангары и её притоков (р. Иномакиткан, р. Нюмнянда, р. Улса, р. Анамакит, р. Светлая, р. Асикта). Общая площадь впадины 3800 км², средняя относительная высота бортов 1950 м [3]. По морфогенетическому признаку выделяются наклонные аллювиально-пролювиальные, плоские террасированные аллювиальные, плоские озерно-аллювиальные основные типы рельефа. На участках, подвергавшихся в интенсивному рельефообразующему воздействию ледников распространён холмисто-западинный и грядово-увалистый рельеф. Элементы рельефа обусловлены развитием флювиальных, гляциальных, озерных и отчасти эоловых процессов, а также современных водно-эрозионных, криогенных и др. [3]. Днище впадины заполнено мощной толщей рыхлых отложений (аллювиальных, аллювиально-озерных и ледниковых).

Широкий диапазон горных вершин и отчасти предопределенное этим неодинаковое развитие денудационных процессов обуславливает разнообразие рельефа. Горные хребты имеют складчатый характер со множеством остроконечных, пикообразных, гольцовых вершин. Наряду с острогребневыми хребтами наблюдаются пологосводчатые, плосковершинные, среди которых имеют место скальные останцы. Сложены преимущественно кислыми породами: мелко-среднезернистыми, иногда порфирированными гранитами, амфиболовыми гранитами, сиенитами. Подчиненное распространение имеют габбро, габбро-диориты и диориты. Также ограничено распространены кристаллические сланцы, песчаники, гравелиты, известняки.

Материалы и методы. Геоморфометрический анализ рельефа на основе ЦМР является важной частью современных геоэкологических исследований в силу доступности исходного материала, объективности количественных методов расчета и единовременной обзорности значительных территорий [11,10, 8]. Выделяют 4 группы геоморфометрических параметров рельефа: геометрические, гидрологические, топографо-микrokлиматические, вертикальная дифференциация природной среды [4]. ЦМР Верхнеангарской котловины была создана в программном обеспечении ArcGIS с использованием векторных слоев горизонталей (высота сечений рельефа 20 м), отметок высот и урезов воды топографической основы м-ба 1:100000 КБ «Панорама» и перенесена в программу SAGA GIS (рис. 1).

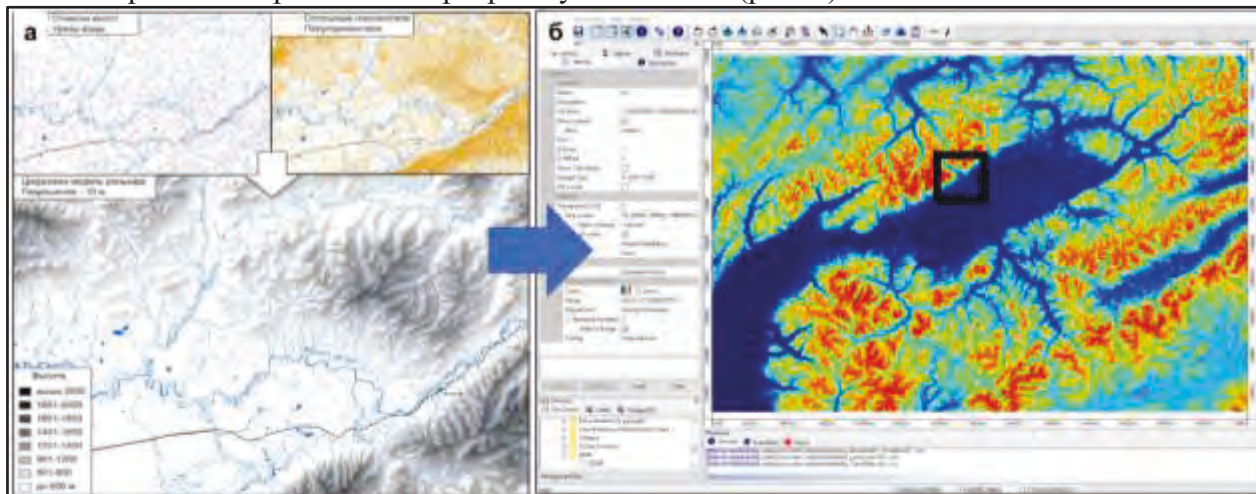


Рис. 1. ЦМР Верхнеангарской котловины в ArcGIS (а)

Интерфейс в SAGA GIS (масштаб 1:100 000, разрешение 10 м) (б)

Для исследования параметров рельефа был выбран модельный полигон, отображающий все геоморфологические признаки (рис. 1б).

В задачи данного исследования входило составить карты морфометрических параметров рельефа (МПП) и провести кластерный анализ. При кластеризации применялся алгоритм k-средних методом итеративного минимального расстояния [10]. В результате кластерного анализа полученные карты разделяли территорию исследования на области соответствующих минимальным, средним и максимальным кластерам значений параметров.

Уклон представляет собой угол между горизонтальной и тангенциальной плоскостями в данной точке земной поверхности. Определяет скорость потоков, перемещающихся вдоль поверхности под действием гравитации (рис. 2а).

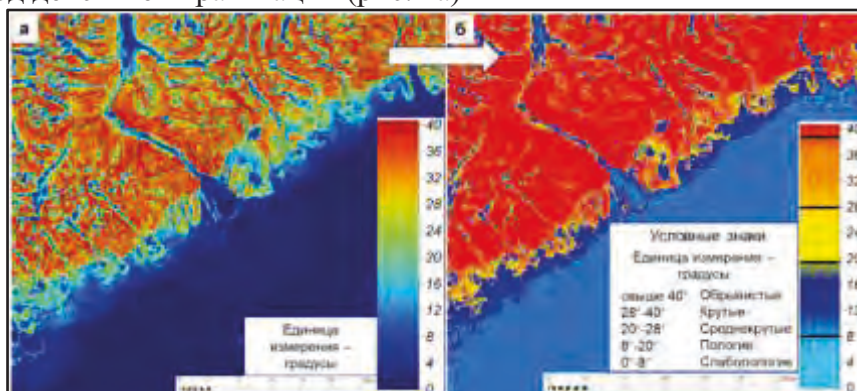


Рис. 2. Уклон.

Анализ уклона (рис. 2б) исследуемой территории показывает, что благоприятные условия для формирования и развития опасных гравитационных процессов характерны для

склонов со значением крутизны выше 8°. Градация склонов проводилась по углу наклона и эрозионной опасности [5].

Индекс расчленённости рельефа характеризуется длиной гидрографической сети на 1 км² площади, а также средней шириной водосборного бассейна. Высокие значения свидетельствуют о повышенной локальной расчленённости рельефа (рис. 3а).

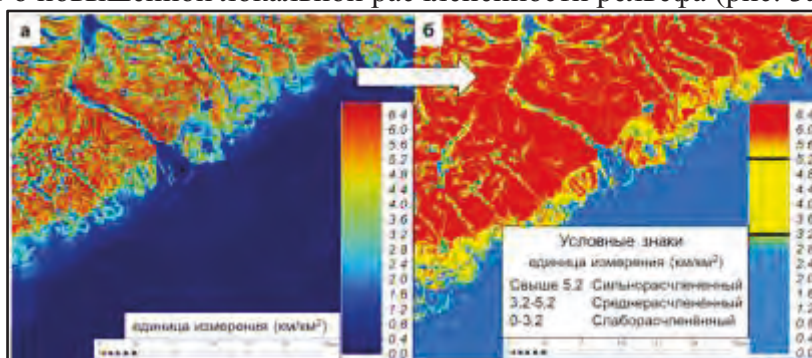


Рис. 3. Индекс расчленённости рельефа.

Анализ карты индекса расчленённости рельефа (рис. 3б) показывает, что для исследуемой территории наиболее характерен преимущественно сильнорасчлененный рельеф с большим значением относительных превышений. Высокий уклон склонов, скалистость, создают условия для широкого проявления экстремальных гравитационных процессов с высокой степенью вероятности.

Индекс баланса геомасс раскрывает топографические предпосылки к разрушению и отложению грунтов. Данный показатель позволяет выявить участки с высокой степенью вероятности развития осыпных склоновых процессов (рис. 4а).

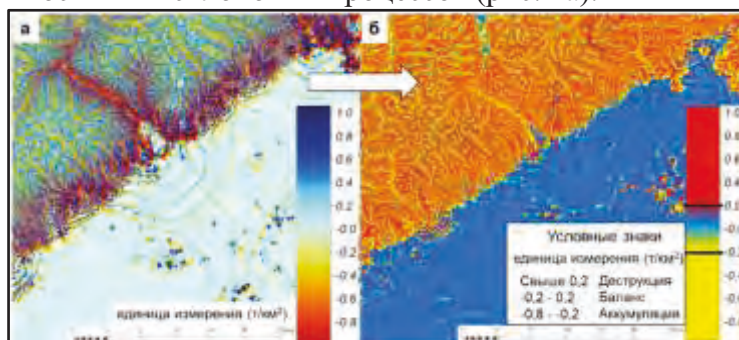


Рис. 4. Индекс баланса геомасс.

Анализ карты индекса баланса геомасс (рис. 4б) показывает, что отрицательные значения индекса соответствуют области аккумуляции геомассы – это впадины и поймы рек. Положительные значения указывают на участки с высокой степенью риска деструктивных процессов, такие как склоны холмов. Значения индекса, близкие к нулю демонстрируют области баланса между эрозией и отложением, такие как низкие склоны и равнины.

Индекс потенциала плоскостной эрозии описывает комбинированное влияние длины склона и уклона. Представляет собой отношение потерь почвы на единицу площади участка. Является важным ландшафтно-экологическим показателем, имеющим существенное значение при планировании землепользования, организации охраны земель и водных объектов, оценке эрозионной сети (рис. 5а).

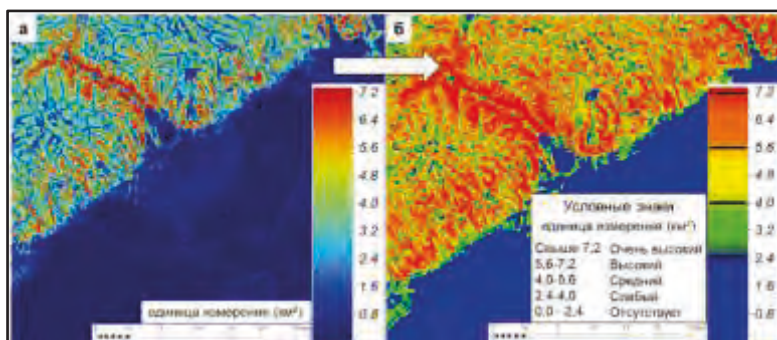


Рис. 5. Индекс потенциала плоскостной эрозии.

Анализ карты индекса потенциальной плоскостной эрозии (рис. 2б) показывает, что очень высокий индекс соответствует средне-крутым склонам с углом наклона от 20° до 28° и длиной склона 1,5-2 км. Высокий и средний индекс соответствует пологим склонам с уклоном 8° - 20° и длиной склона 3-5 км. Слабый индекс или полное его отсутствие характерен для уклона менее 8° .

Топографический индекс влажности показывает участки с более высокой потенциальной влажностью и скоростью стока воды. Имеет зависимость от уклона и площади водосбора. Высокие значения показателя – потенциально более влажные районы.

Этот индекс учитывает особенности рельефа как на повышенных, так и пониженных участках, т.е. если имеются понижения на возвышенных участках, то это отражается в увеличении значений индекса относительно прилегающих возвышенных участков (рис. 6а).

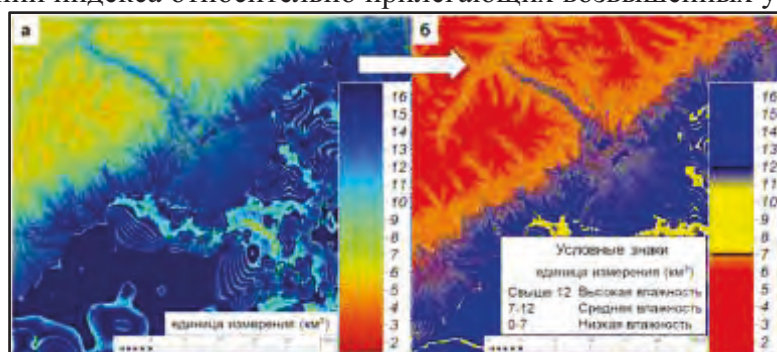


Рис. 6. Индекс топографического индекса влажности.

Анализ карты топографического индекса влажности (рис. 6б) показывает, что высокий индекс соответствует равнинным участкам и участкам с уклоном до 8° и значительной концентрацией водотоков. Средний индекс соответствует среднекрутым участкам с уклоном 20° - 28° и незначительным числом водотоков. Низкий индекс характерен для крутых и обрывистых склонов с уклоном более 28° .

Индекс мощности эрозии – это мера потенциальной эрозионной силы поверхностных потоков. Преимуществом данной модели является создание качественной характеристики территории (и ее представление в картографическом виде) на основе базовых количественных данных. А его обоснование строится на том, что степень проявления и развития эрозионных процессов прямо зависит от площади водосбора и крутизны склонов на исследуемой территории более высокие значения указывают на то, что эрозия более вероятна (рис. 7а)

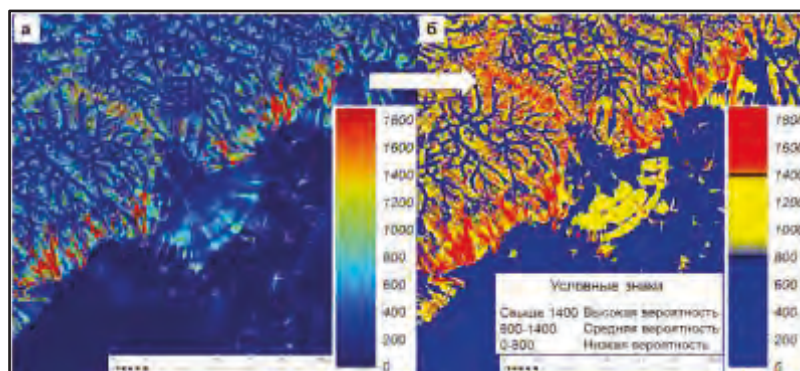


Рис. 7. Индекс мощности эрозии.

Анализ карты индекса мощности эрозии (рис. 7б) показывает, что высокий индекс соответствует среднекрутым и крутым участкам с уклоном от 20° до 40° и значительной концентрацией водотоков. Средний индекс соответствует пологим участкам с уклоном 8° - 20° и незначительным числом водотоков. Низкий индекс характерен для долинных участков русла р. Верхняя Ангара. Также ярко выражены конусы выноса, представляющие собой крупномасштабную морфологическую структуру, созданную реками с твёрдым донным стоком и скопление валунов, гальки, песка, глины и других материалов.

Результаты и их обсуждение. Картографирование морфометрических параметров рельефа необходимо для дальнейшего анализа геоморфологических признаков исследуемой территории. Чаще всего необходимо определить какие из рассматриваемых участков подвержены локальным опасным склоновым процессам.

При совмещении карты аккумуляции потока и водотоков была получена карта водосборных бассейнов (рис. 3а). Такая карта может быть полезна для управления земельными и водными ресурсами и позволяет определить приоритетные районы землепользования и визуализировать гидрологию района.

На основе всех проанализированных параметров рельефа было проведено зонирование территории по вероятности формирования опасных гравитационных процессов (рис. 3б).

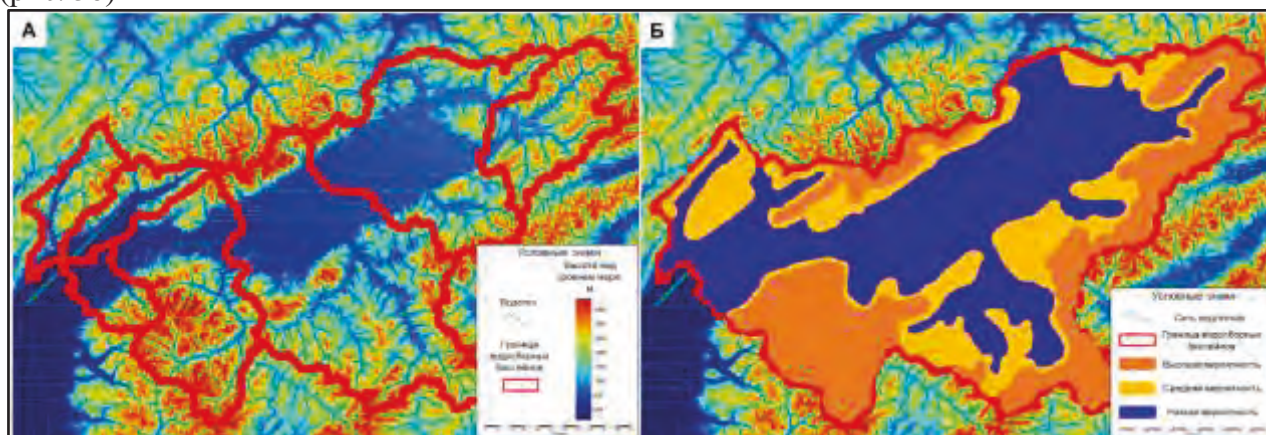


Рис. 3 А – карта водосборных бассейнов; Б – карта зонирования территории по вероятности формирования опасных гравитационных процессов

На карте выделены следующие зоны с разной степенью интенсивности и распространенности потенциально ОГП. Для каждой зоны была дана характеристика на основе всех проанализированных морфометрических параметров рельефа (табл. 2). Преобладающим для территории исследования является процесс аккумуляции материала, которая приурочена к понижениям в рельефе и совпадает с поймами крупных рек.

Характеристика участков по всем морфометрическим и гидрологическим параметрам рельефа

№	Вероятность формирования ОГП	Характеристики участков
1	Высокая вероятность проявления ОГП на участках сноса материала	уклон более 20°; индекс расчленённости рельефа свыше 5,2 км/ км ² ; индекс баланса геомасс более 0,2 т/ км ² ; индекс плоскостной эрозии более 4,0 км ² ; индекс влажности менее 7 км ³ ; индекс мощности эрозии свыше 1400
2	Средняя вероятность с возможным проявлением ОГП на участках транзита материала	уклон 8°- 20°; индекс расчленённости рельефа 3,2 - 5,2 км/ км ² ; индекс баланса геомасс менее -0,2 т/ км ² ; индекс плоскостной эрозии 2,4 - 4,0 км ² ; индекс влажности менее 7-12 км ² ; индекс мощности эрозии 800 - 1400
3	Низкая вероятность с потенциальным развитием аккумулятивных процессов на участках накопления материала	уклон менее 8°; индекс расчленённости рельефа менее 3,2 км/ км ² ; индекс баланса геомасс -0,2 – 0,2 т/ км ² ; индекс плоскостной эрозии менее 2,4; индекс влажности более 12 км ³ ; индекс мощности эрозии менее 800

Выводы.

1. В результате исследования проведён анализ территории Верхнеангарской котловины на наличие опасных склоновых и эрозионных процессов. Составлены карты морфометрических параметров рельефа. Выполнено районирование исследуемой территории по степени вероятности формирования и развития опасных гравитационных процессов.

2. Проведенные исследования показали высокую эффективность использования SAGA GIS - геоинформационной программы с открытым кодом при обработке ЦМР для картографирования опасных гравитационных процессов на региональном уровне с опорой на материалы, полученные при исследовании и наблюдении модульного полигона.

3. Инструменты SAGA GIS позволяют выявлять на земной поверхности участки подверженные эрозионным процессам, накоплению геомассы, проводить анализ расчленённости рельефа и крутизны склонов, а также оценивать влажность исследуемых территорий с целью выявления скрытых опасных процессов.

4. Результаты исследования можно использовать при ведении хозяйственной деятельности в северных районах Республики Бурятия. Отработанную технологию представляется возможным рекомендовать к применению для других территорий Восточной Сибири.

Выявленные на основе геоморфометрического анализа особенности территории следует учитывать при её хозяйственном освоении, разработке месторождений, строительстве дорог, развитии инфраструктуры, вырубке лесов и прочей антропогенной деятельности.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-27-00261).

Литература

1. Абросимов А.В., Сизов О.С. Геопространственное дистанционное обеспечение предотвращения рисков, связанных с термоэрозией в условиях Крайнего Севера // Геопрофи. 2013. № 6. С. 10-14.
2. Борисова Т.А. Природно-антропогенные риски в бассейне озера Байкал. –Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2013. 126 с.
3. Выркин В.Б. Современное экзогенное рельефообразование котловин байкальского типа. Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН. 1998. 175 с.
4. Глотов А. А. Использование ЦМР для эффективного управления природопользованием. Геоматика. 2013. № 4. С. 32–36.;
5. Заславский М.Н. 1962. Эрозия почв. М.: Мысль, 245.
6. Ковда В. А., Зонн С. В. Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 262 с
7. Морфометрия современной поверхности и неотектоническая структура территории ВКМ / Трегуб А. И., Жаворонкин О. В. // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геология. 2000. Вып. 9. С. 19-26.
8. Некоторые аспекты использования ГИС-технологий при морфометрическом анализе рельефа / Глейзер И. В., Копанева И. М., Рублева Е. А. // Вестник Удмуртского университета, 2006. № 11. С. 143-146.
9. Florinsky I.V. Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology. Elsevier / Academic Press, Amsterdam. 2016. 486 p.
10. Forgy, E. (1965): Cluster analysis of multivariate data: efficiency vs. interpretability of classifications. Biometrics 21:768.
11. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science, vol. 33. / Hengl T., Reuter H.I. (Eds.). 2008. 772 p.
12. Kirkby M.J. and Chorley R.J., 1967, Throughflow, overland flow and erosion // Internat. Assoc. Sci. Hydrology Bull., vol.12, No.3, pp.5-21.
13. Martz L. W. and de Jong, E., A FORTRAN program for measuring catchment area from digital elevation models. Computer and Geosciences, 1988.14(5):627-640.
14. Speight, J.G., A parametric approach to landform regions. // Progress in Geomorphology: London: Institute of British Geographers. 1974. pp. 213–230.
15. SAGA GIS : программное обеспечение с открытым кодом для ЭВМ. – URL: <https://saga-gis.sourceforge.io/en/index.html>