

В. П. Ступин^{1✉}

Геоморфометрический ГИС-анализ ЦМР в интересах картографического мониторинга опасных геологических процессов горного хребта Хамар-Дабан

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация
e-mail: stupinigu@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты геоморфометрического анализа цифровой модели рельефа (ЦМР) SRTM на территорию хребта Хамар-Дабан средствами SAGA-GIS в интересах изучения, картографирования и мониторинга опасных экзогенных геологических процессов (ЭГП). Проанализированы состав и возможности различных модулей SAGA-GIS по получению морфологических, гидрологических и микроклиматических геоморфометрических параметров рельефа. Приведена интерпретация полученных параметров с точки зрения их применения для качественной и количественной оценки спектра, пораженности, интенсивности и потенциальной опасности ЭГП на исследуемой территории.

Ключевые слова: ГИС-анализ ЦМР, геоморфометрия, картографирование ЭГП

V. P. Stupin^{1✉}

Geomorphometric GIS analysis of DEM in the interests of cartographic monitoring of hazardous geological processes in the Khamar-Daban mountain range

¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation
e-mail: stupinigu@mail.ru

Abstract. The results of the geomorphometric analysis of the digital relief model (DEM) SRTM on the territory of the Khamar-Daban ridge using SAGA-GIS tools in the interests of studying, mapping and monitoring dangerous exogenous geological processes (EGP) are presented. The composition and capabilities of various SAGA-GIS modules for obtaining morphological, hydrological, and microclimatic geomorphometric terrain parameters are analyzed. The interpretation of the obtained parameters from the point of view of their application for qualitative and quantitative assessment of the spectrum, severity, intensity and potential danger of EGP in the studied area is given.

Keywords: GIS analysis of DEM, geomorphometry, EGP mapping

Введение

В пределах хребта Хамар-Дабан, расположенного вдоль южного берега озера Байкал, отмечается высокая степень пораженности и интенсивности опасных экзогенных геологических процессов (ЭГП) – эрозии, паводков, селей, обвалов, осыпей, оползней, снежных лавин, образования наледей, абразии и др. [1–3] Особенно уязвимыми являются прибрежные обжитые территории у подножия северного макросклона хребта, по которым проходят Транссибирская железнодорожная магистраль, Федеральная автомобильная трасса Р-258 «Байкал», линия

ЛЭП-500. Здесь же расположен ряд населенных пунктов, туристских баз и промышленных предприятий.

Одним из основных факторов возникновения и развития опасных ЭГП является рельеф, что и обуславливает необходимость его всестороннего изучения и анализа. Эффективными инструментами такого анализа являются методы геоморфометрии с использованием ГИС.

Геоморфометрия изучает теорию и практику аналитико-картографического анализа земной поверхности по ЦМР компьютерными средствами [4]. Она основана на достижениях геометрии поверхностей, топографии, геоморфологии и вычислительной техники. Геоморфометрические модули входят в состав любых ГИС и направлены на пространственный анализ и извлечение параметров (морфометрических, гидрологических, климатических и т. д.) и объектов (водоразделов, речных сетей, форм рельефа и т. д.) земной поверхности с использованием входной цифровой модели рельефа (ЦМР) и программного обеспечения для параметризации. Полученные данные используют при картографировании и моделировании геоморфологических и геологических процессов и явлений, изучении растительности и почв, землепользовании, ландшафтных исследованиях и т.п.

Методы и материалы

В ЦМР рельеф представлен отметками высот, определенных в узлах регулярной или нерегулярной сетки по формуле:

$$z = f(x, y) + e_1 + e_2 \quad (1)$$

где: $f(x, y)$ – функция представления высот через плановые координаты; e_1 – систематическая ошибка; e_2 – случайная ошибка. Чаще используются растровые регулярные модели (DEM), поскольку они имеют унифицированную пространственную структуру, используют более простые алгоритмы, лучше подходит для отображения экране дисплея и вывода на печать.

Существует много как региональных, так и глобальных моделей рельефа различного разрешения. В открытом доступе можно получить такие модели как ETOPO5 с разрешением 5'; GTOPO30 с разрешением 30"; GMTED 2010 с разрешением 30", 15" и 7,5"; SRTM с разрешением 1", 3" и 30"; Aster GDEM; ALOS World 3D с разрешением 1".

В нашем исследовании применялась DEM SRTM с шагом сетки: 1", 3", 30". Данные были получены с борта космического челнока «Индевор» в период с 11 по 22 февраля 2000 г. с использованием радарных систем C-SIR и X-SAR. Покрытие: 60° с.ш.– 56° ю.ш. Проекция и эллипсоид: долгота/широта на WGS 84. Разработчики – космические агентства США (NASA, USGA), Германии (DLR) и Италии. ЦМР SRTM C-SIR доступна для скачивания с сайта USGS.

В обработку выключены тайлы 57_02 и 58-02 ЦМР SRTM с шагом сетки 3" (разрешение 95 м). Обработка осуществлялась с использованием программы SAGA GIS 9.8.0 (64 bit). В этой программе в модуле «Mosaicking» была создана мозаика указанных тайлов, которая была обрезана до территории северного мак-

росклона хребта Хамар-Дабан в пределах южного побережья озера Байкал на протяжении 50 км от пос. Култук до р. Хара-Мурин (рис. 1).

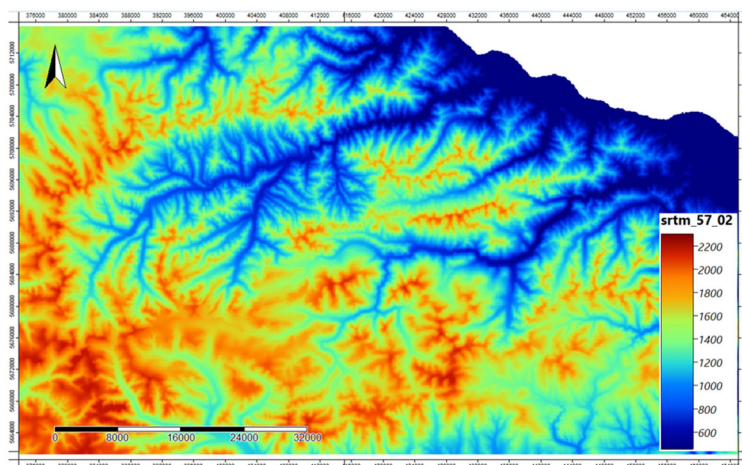


Рис. 1. Фрагмент DEM SRTM на территорию исследований

DEM по умолчанию отображается в Graduated Color представлении. Для отображения высотных поясов ее можно дискретизировать на соответствующие классы, количество и параметры которых определяются высотной поясностью.

Существует два метода геоморфометрического анализа DEM.

Первый подход основан на математической формализации земной поверхности, например, по формуле Эванса [5]:

$$z = Ax^2 + By^2 + Cxy + Dx + Ey + F \quad (2)$$

Второй подход выполняет расчет показателя в пикселе с учетом его окружения с использованием скользящего окна.

Можно выделить три группы параметров, получаемых в ГИС по DEM в целях геоморфометрического анализа:

- морфологические параметры: крутизна, кривизна др., которые напрямую отображают морфологические особенности территории, определяющие направленность, скорость и интенсивность склоновых процессов под воздействием силы тяжести [6];

- гидрологические параметры: дренажные бассейны, сети тальвегов, различные индексы (топографический индекс влажности, индекс мощности линейной эрозии, индекс баланса геомасс), зоны потенциального затопления и др.), которые используются для оценки поверхностного стока, степени увлажнения почвы и условий перемещения обломочного материала;

- топографо-микроклиматические: экспозиция, потенциальная солнечная радиация, температура земной поверхности, воздействие ветра и др., которые определяют влияние земной поверхности на распределение солнечной радиации, характеристики температурного поля и выпадение осадков.

Морфологическая группа параметров геоморфометрического анализа включает, прежде всего, уклон, экспозицию и основные виды кривизны. Для их расчета используется модуль «Slope, Aspect, Curvature», который находится в группе инструментов «Terrain Analysis» Morphometry».

Наиболее востребованным параметром являются уклон, который характеризуют градиент поверхности, и выражается производной первого порядка. Карта уклона поверхности (S_T) отображает углы наклона в точке пересечения между горизонтальной плоскостью и плоскостью касательной к земной поверхности и определяется по формуле, учитывающей изменения уклона в пределах $0-90^\circ$ [7]:

$$S_T = \frac{360}{2\pi} \arctg \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \quad (3)$$

где x, y, z – соответственно, абсцисса, ордината и аппликата узла DEM.

Горизонтальная кривизна (k_h) – кривизна линии, образованной пересечением земной поверхности с плоскостью, перпендикулярной к направлению максимального градиента [8, 9]. Вычисляется по формуле:

$$k_h = \frac{q^2 \cdot r - 2p \cdot q \cdot s + p^2}{\sqrt{(1+p^2+q^2)^3}} \quad (4)$$

где: $p = \frac{\delta z}{\delta x}$; $q = \frac{\delta z}{\delta y}$; $r = \frac{\delta^2 z}{\delta x^2}$; $s = \frac{\delta^2 z}{\delta x \delta y}$; $t = \frac{\delta^2 z}{\delta y^2}$

Вертикальная кривизна (k_v) – кривизна линии, образованной пересечением земной поверхности и вертикальной плоскости [7]. Вычисляется по формуле:

$$k_v = \frac{p^2 \cdot r + 2p \cdot q \cdot s + q^2 \cdot t}{(p^2 + q^2) \sqrt{(1+p^2+q^2)^3}} \quad (5)$$

где значения p, q, r, s, t – те же, что и в (4).

Инструменты гидрологического моделирования выявляют линии стока, и их направление, что позволяет выделять водоразделы, тальвеги и их порядки, что позволяет вывести ряд важных морфодинамических характеристик водотоков. Предварительно на DEM обязательно выполняется заполнение локальных понижений (модуль «Fill Sinks»).

Дренажные бассейны и сети тальвегов в векторном формате строятся с использованием инструмента Channel Network and Drainage Basins. Одновременно создается растровая карта порядка водотоков по методу Штралера (1957). Сеть тальвегов формируется по принципу модели восьминаправленного стока (D8). Размерность сети задается опционально.

Инструмент Compound Basic Terrain Analysis позволяет получить параметры, связанные с гидрологией – миграцией вещества и энергии, перераспределением стока, потенциалом площадной и линейной эрозии [10] с помощью мо-

дулей Total Catchment Area (TCA), Topographic Wetness Index (TWI), SAGA Wetness Index, Mass Balance Index, LS.

Модуль TCA рассчитывает накопления потока и связанных с ним параметров, модуль TWI выявляет перераспределение влаги, модуль LSF – относительный показатель эрозии с учётом уклона и длины склона, модуль SPI используется для описания потенциальной энергии потока в данной точке рельефа.

Экспозиция (A_T) – угол по часовой стрелке между направлением на север и проекцией уклона на горизонтальную плоскость; фиксирует направление градиента земной поверхности [7]. Вычисляется по формуле:

$$A_T = 270 - \frac{360}{2\pi} \arctg \left(\frac{\partial z}{\partial y} / \frac{\partial z}{\partial x} \right) \quad (6)$$

где x , y , z – абсцисса, ордината и аппликата узла DEM.

Среди топографо-микrokлиматических параметров выделим индекс ветровой экспозиции (WEI) и индекс потенциальной солнечной радиации (PISR). WEI определяет средний индекс эффекта ветра для всех направлений с шагом в 15° и расстоянием поиска 300 км, а PISR – расчет потенциальной поступающей солнечной радиации [11].

Результаты и обсуждение

В результате проведенного исследования на территорию северного макрослона хребта Хамар-Дабан по DEM SRTM были построены и проанализированы рассмотренные выше геоморфометрические карты, представить иллюстрации которых не позволяет объем данной статьи.

Совместный анализ полученных карт, аэрокосмических снимков и научно-справочных материалов позволил сделать ряд выводов по связи морфологических и морфометрических характеристик рельефа со спектром, пораженностью и интенсивностью ЭГП исследуемой территории.

Так, карты уклонов позволяют локализовать, определяет характер и оценить интенсивность рельефообразующих факторов на склоне, а именно:

- характер поверхностного стока и дренирования;
- линейную эрозию, которая заметно проявляется при уклонах $8-9^\circ$;
- наличие и примерную мощность чехла рыхлых склоновых отложений;
- величину инсоляции, определяющей микrokлиматические особенности склона (температуру, влажность, мощность деятельного слоя).

На исследуемой территории также выявлена зависимость между крутизной склонов и типом ведущих ЭГП, развивающихся на этих склонах

Обвалы и осыпи происходят на склонах круче 40° . Абсолютное большинство лавин сходит на углах наклона между 25° и 60° , а их максимальное количество приходится на углы $35-40^\circ$. Для возникновения селей необходима крутизна склона в верхней части $25-30^\circ$, в нижней – $8-15^\circ$. При меньших уклонах движение селей затухает.

Высотная поясность обуславливает дифференциацию ЭГП по абсолютным высотам, виды и спектр ведущих процессов, а также их направленность, степень пораженности и интенсивность. На исследуемой территории обоснованы, выделены, и построены по ЦМР пять высотных морфодинамических поясов: прибрежно-равнинный, предгорно-равнинный, предгорный, низкогорный, подгольцовый и гольцовый.

Для прибрежно-равнинного пояса (456–550 м) ведущими ЭГП являются абразия берегов Байкала, флювиальная аккумуляция, паводки, селевые выбросы, образование наледей, фитогенные болотные процессы, а также техногенная трансформация рельефа. Антропогенная нарушенность высокая.

В пределах предгорно-равнинного пояса (550–700 м) преобладают флювиальная эрозия и аккумуляция, проходят долинные сели, а также активны техногенные процессы. Антропогенная нарушенность высокая.

В предгорном поясе (700–900 м) развиты флювиальные денудационные и аккумулятивные процессы, проходят долинные сели, а также гравитационные процессы. Антропогенная нарушенность средняя.

В низкогорном поясе (700–1200 м) господствуют флювиальные денудационные гравитационные процессы, криогенные процессы, крип, оползни, склоновые сели, осыпи, сплывы. Антропогенная нарушенность низкая.

В подгольцовом поясе (1200–1500 м) развиты гравитационные, криогенные, флювиальные денудационные процессы, лавины, курумы. Антропогенная нарушенность отсутствует.

Наконец, в гольцовом поясе (от 1500 м и до максимальной высоты 2123 м) имеют место преимущественно гравитационные (обвалы, осыпи, лавины) и криогенные (морозное выветривание) процессы, элювиальные, курумы, крип. Антропогенная нарушенность отсутствует.

Горизонтальная кривизна выявляет выпуклые и вогнутые поверхности, которые формируют, дивергентный или конвергентный рисунок линий тока вещества и энергии под действием силы тяжести, т.е. определяют, соответственно, области денудации и аккумуляции.

Вертикальная кривизна описывает градиент уклона и отображает выпуклые (вогнутые) в профиле поверхности, для которых свойственно ускорение (замедление), т.е. преобладание денудации (аккумуляции). Чехол рыхлых отложений, а также снежный покров на крутых выпуклых склонах испытывают растягивающие напряжения, что делает такие склоны наиболее благоприятными для, формирования оползней и схода снежных лавин.

Установлено, что порядок водотоков при пороговом значении Threshold равном 4 лучше всего соответствует положениям бассейновой концепции [12]. При таком пороге реки Снежная и Хара-Мурин и Утулик имеют V порядок, Максимиha, Мантуриха и Мишиха – IV порядок, прочие постоянные водотоки занимают тальвеги III порядка и часть тальвегов II порядка. Остальные тальвеги II порядка и почти все тальвеги I порядка занимают временные, пересыхающие водотоки. Анализ гидросети позволяет выявить территории с преобладающим

плоскостным смывом, тальвеги, по которым сходят склоновые сели, тальвеги, потенциально опасные с точки зрения прохождения паводков.

Анализ водосборов позволяет оценить запасы накапливаемой дождевой и талой воды и рассчитать вероятность, расход и скорость движения паводковых вод, а также определить потенциал линейной эрозии.

Экспозиция характеризует направление линий тока под действием силы тяжести вниз по склону. Также она определяет ориентацию склонов по отношению к потоку солнечных лучей, т.е. их инсоляцию, что в конечном счете влияет на микроклимат склонов – температуру, влажность, испарение, мощность деятельного слоя, растительность. На территории исследований склоны южной экспозиции прогреваются лучше, чем северной. Также важно направление господствующих ветров. На Хамар-Дабане, при прочих равных, в зависимости от ветра наиболее опасны склоны северо-восточных и восточных экспозиций, что связано с преобладанием юго-западных и западных ветров и накоплением снега на подветренных склонах северо-восточных экспозиций.

Индексные карты позволяют выявить селеопасные русла и бассейны, перераспределение влаги по водосборам, оценить эрозионный потенциал рельефа и защитный потенциал растительного покрова, а также области, находящиеся на ветру или имеющие разный температурный режим земной поверхности, что определяет тип и интенсивность выветривания и характеристики мерзлых грунтов.

Заключение

Геоморфометрический анализ DEM свободного доступа средствами ГИС с открытым кодом позволяет получить оперативные, объективные, количественные и геопривязанные параметры рельефа. Полученные параметры позволяют создать качественную картографическую основу для изучения, анализа и картографирования ЭПП обширных и труднодоступных территорий, к которым относится и хребет Хамар-Дабан.

Достоверность и информационные возможности такой основы возрастают, если полученные данные дополнены гидрологическими и топографо-микроклиматическими параметрами рельефа, которые также могут быть получены по DEM средствами ГИС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаров С.А. Склоновые рельефообразующие процессы в таежной зоне хребта Хамар-Дабан // Генезис рельефа. Иркутск, 1995. – С. 131-133 // Геориск, 2020, том XIV, №2, С. 78-87.
2. Ступин В.П., Пластинин Л.А., Олзоев Б.Н. Возможности материалов дистанционного зондирования как информационной основы картографирования селевой опасности Байкальской горной страны // Геориск, 2020, том XIV, №2, С. 78-87.
3. Рыбченко А.А., Кадетова А.В., Юрьев А.А. Селевые паводки северного склона хребта Хамар-Дабан в 2019 году. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 591-595.].

4. Флоринский И.В. Иллюстрированное введение в геоморфометрию // Альманах «Пространство и время». – 2016. – Т. 11. – Вып. 1. – 20 с
5. Evans I.S. "General Geomorphometry, Derivations of Altitude, and Descriptive Statistics." *Spatial Analysis in Geomorphology*. London: Methuen, 1972, pp. 17-90.
6. Evans I.S. Statistical Characterization of Altitude Matrices by Computer. An Integrated System of Terrain Analysis and Slope Mapping. The Final Report on Grant DA-ERO-591-73-G0040. Durham: University of Durham, 1979. 192 p.
7. Шарый П.А. Топографический метод вторых производных // Геометрия структур земной поверхности. Пущино: ПНЦ АН СССР, 1991. С. 30-60.
8. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. "Fundamental Quantitative Methods of Land Surface Analysis." *Geoderma* 107.1–2 (2002): 1-32.
9. Krcho J. "Teoretická koncepcia a interdisciplinárne aplikácie komplexného digitálneho modelu reliéfu pri modelovaní dvojdimenzionálnych polí." *Geografický Časopis* 35.3 (1983): 265-291.
10. Conrad, O. (2005): Digitale Reliefanalyse in der multimedialen Lehre. *Arbeitsberichte des Geographischen Instituts der Humboldt-Universität zu Berlin*, Bd.109, S.37-47.
11. Böhner, J., Antonic, O. (2009): Land-surface parameters specific to topo-climatology. In: Hengl, T., Reuter, H. [Eds.]: *Geomorphometry - Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*, Volume 33, p.195-226, Elsevier.
12. Корытный Л.М. Бассейновая концепция в природопользовании – Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2001. – 163 с.

© В. П. Ступин, 2025