

УДК 551.3

DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-670-682

Н.И. Сабитова¹, А.Г. Стельмах², Н.Р. Таджибаева³, В.Д. Минченко⁴

ПРИМЕНЕНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ И КАРТ ПЛАСТИКИ РЕЛЬЕФА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПОЛЗНЕЙ ЧИРЧИКСКОГО БАССЕЙНА

АННОТАЦИЯ

В последние годы значительно увеличилось количество природных катастроф, в том числе вызванных экзогенными геологическими процессами, одними из ведущих среди которых являются оползни, приводящие к экологическим, инженерным, социальным и экономическим последствиям. Исследуемый Чирчикский бассейн Республики Узбекистан характеризуется сложными геоморфологическими, гидрологическими и геологическими условиями, а также наличием активного геодинамического процесса, что предопределило здесь развитие оползней и оползневых явлений. В настоящее время применяются различные методы комплексного изучения оползней различного генезиса. Наряду с традиционными методами широко используется различный инструментарий геоинформационных систем (ГИС). Применение ГИС-обработки цифровых моделей рельефа позволяет более полно описывать развитие оползневых процессов: быстро получить информацию о морфометрических показателях (высота, угол наклона, экспозиция склона) в любой точке модели, анализировать крутизны и экспозиций склонов, поверхностный сток, проводить генерацию горизонталей и др., а также нанести их на карту. Другой метод исследования – метод пластики рельефа, сущность которого состоит в геометрическом преобразовании горизонталей топографических карт, что в результате позволило получить карту с изображением литодинамических потоков. Предлагаемая методика комплексного применения технологий ГИС и карт литодинамических потоков разработана с учетом работ, выполненных зарубежными и отечественными специалистами. На основе полевых исследований методика применена для изучения оползневых процессов Байбаксай-Сулисайского участка Чирчикского бассейна. В результате были составлены цифровые модели рельефа по материалам дистанционного зондирования SRTM и QuickBird и на основании цифровой модели рельефа, используя метод пластики рельефа, создана карта литодинамических потоков.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровая модель рельефа, геоинформационные системы технологий, карта пластики рельефа, рельеф, оползень

¹ Национальный университет Узбекистана имени М. Улугбека, Факультет географии и природных ресурсов, ул. Университетская, д. 4, 100174, Ташкент, Узбекистан; *e-mail*: nellisabitova@mail.ru

² Национальный университет Узбекистана имени М. Улугбека, Факультет геологии и геоинформационных систем, ул. Университетская, д. 4, 100174, Ташкент, Узбекистан; *e-mail*: stelmakh@rambler.ru

³ Национальный университет Узбекистана имени М. Улугбека, Факультет геологии и геоинформационных систем, ул. Университетская, д. 4, 100174, Ташкент, Узбекистан; *e-mail*: nadira.ruzievna@mail.ru

⁴ Институт ГИДРОИНГЕО, ул. Олимлар, 64100041 Ташкент, Узбекистан, *e-mail*: gidroingeo_uz@umail.uz

Naila I. Sabitova¹, Anna G. Stelmakh², Nadira R. Tajibaeva³, Vyacheslav D. Minchenko⁴

APPLICATION OF GIS TECHNOLOGIES AND PLASTIC FLOW MAP FOR STUDYING LANDSLIDES OF THE CHIRCHIK BASIN

ABSTRACT

In recent years, the number of natural disasters has significantly increased, including those caused by exogenous geological processes, one of the leading among which are landslides, leading to environmental, engineering, social and economic consequences. The investigated Chirchik basin of the Republic of Uzbekistan is characterized by complex geomorphological, hydrological and geological conditions, as well as the presence of an active geodynamic process, which predetermined the development of landslides here. Currently, various methods are used for the integrated study of landslides of various genesis. Along with traditional methods, various tools of geographic information systems (GIS) are widely used. The use of GIS-processing of digital elevation models makes it possible to fully describe the development of landslide processes: quickly obtain information about morphometric indicators (height, inclination angle, slope exposure) in any model, analyze slope steepness and exposure, frequency runoff, generate contour lines, etc., as well as to map them. Another method of research is the method of relief plastics, the essence of which is the geometric transformation of the contours of topographic maps, it consists in the use of a new topographic map – relief plastics based on litodynamic flows. The proposed methodology for the integrated application of GIS technologies and plastic flow maps was developed taking into account the work performed by foreign and domestic specialists. This methodology applied to landslide processes study in the Baibaksay-Sulisay section of the Chirchik basin. As a result, digital elevation models were compiled based on SRTM and QuickBird remote sensing materials, based on the digital elevation model, using the theory, a map of convex and concave surfaces was created.

KEYWORDS: digital elevation model, geoinformation technology systems, relief plastic map, relief, landslide

ВВЕДЕНИЕ

Развитие оползневой процесса – сложный многофакторный полигенетический процесс, который связан с глобальными, локальными и местными неотектоническими, сейсмическими, климатическими и ландшафтными (вырубка, распашка, выпас, пожары и др.) изменениями, и контролируется развитием речных долин. Наиболее активно оползневые процессы проявляются во время одновременного воздействия атмосферных осадков, длительных низкочастотных глубокофокусных землетрясений и часто в результате хозяйственной деятельности человека [Емельянова, 1972; Ниязов, 2009; Минченко, 2019].

За рубежом исследованию оползней с использованием ГИС-технологий посвящено очень большое количество статей [Dattilo, Spezzano, 2003; Mandal, Mondal, 2019; Intrieri et al., 2020; Solari et al., 2020]. Из этих публикаций следует, что применение ГИС-обработки цифровых моделей рельефа широко используются при изучении оползней, включая

¹ National University of Uzbekistan named after M. Ulugbek, Faculty of Geography and Natural Resources, st. Universitetskaya, 4, 100174, Tashkent, Uzbekistan; e-mail: nellisabitova@mail.ru

² National University of Uzbekistan named after M. Ulugbek, Faculty of Geology and Geoinformation Systems, st. Universitetskaya, 4, 100174, Tashkent, Uzbekistan; e-mail: stelmakh@rambler.ru

³ National University of Uzbekistan named after M. Ulugbek, Faculty of Geology and Geoinformation Systems, st. Universitetskaya, 4, 100174, Tashkent, Uzbekistan; e-mail: nadira.ruzievna@mail.ru

⁴ Institute HYDROINGEO, st. Olimlar, 64100041 Tashkent, Uzbekistan, e-mail: gidroingeo_uz@umail.uz

обнаружение, инвентаризацию, картирование, создание карт подверженности оползням, анализ опасности оползней и их мониторинг.

Оползни и оползневые процессы на территории Республики Узбекистан наиболее широко распространены на склонах Чаткальского, Пскемского, Угамского, Кураминского и Гиссарского хребтов и на чинках Устюрта. Они весьма разнообразны по размерам, строению, причинам образования и условиям, способствующим их возникновению и развитию, механизму, динамике процесса и др. Анализ опубликованных данных показывает, что на площади 15–20 тыс. км² расположено около 2 тысяч оползневых участков, в которых зафиксировано более 10 тысяч случаев различных типов мелких и крупных вторичных, техногенных и новых оползневых смещений. Оползни региона формируются в разнообразных горных породах, но наиболее широко развиты в лессовых и песчано-глинистых четвертичных отложениях, их объемы от нескольких десятков до 15–40 млн м³, а иногда сотен млн м³ [Ниязов, 2009; Минченко, 2019].

Основной целью настоящей работы является показать перспективность методов ГИС-технологий и потоковой карты пластики в визуализации оползневых процессов.

Объектом исследования выбран Байбаксай-Сулисайский участок Чирчикского бассейна площадью около 50 км². Весь участок находится на территории Бостанлыкского района Ташкентской области Республики Узбекистан (в 90 км к северо-востоку от города Ташкента) и расположен на южном побережье Чарвакского водохранилища.

Исследуемый район характеризуется интенсивным проявлением новейших тектонических движений, особенно в плиоцен-четвертичное время. Дифференциация и нарастание этих движений продолжается и на современном этапе: поднятия сильно расчленены, изрезаны множеством постоянных и временных водотоков, глубина расчленения изменяется в широких пределах от 300 до 1000 и более метров. Горные склоны крутые, скалистые с пикообразными вершинами, общий уклон поверхности ориентирован с юга на север в сторону рек Чаткал и Чирчик. Долины этих рек являются базисом стока всей гидросети в описываемом районе.

В геологическом отношении Байбаксай-Сулисайский участок сложен отложениями от каменноугольных до современных включительно. Неоген-четвертичные породы вызывают наибольший интерес в связи с постановкой исследований. С поверхности изучаемый участок покрыт лессовидными суглинками мощностью от 10 до 40 м. На пологих водоразделах Сулисай и Байбаксай под суглинками залегают конгломерато-галечники мощностью 2–6 м. В уступах террас (Кызылсуйской, Сиджакской и Угамской) и делювиальных склонах галечники размыты. Четвертичные суглинки и галечники подстилаются переслаивающимися красноцветными алевритами, песчаниками, глинами и конгломератами неогена мощностью 200–500 м. Общее направление падения пород неогена север-западное 320°, углы падения 18–22°.

Рельеф по морфологическим типам отнесен к тектонико-денудационному, и по морфогенетическим – к ороген-горно-складчатым сооружениям. Аккумулятивно-денудационный рельеф Байбаксай-Сулисайского участка представлен ташкентским циклом (средний плейстоцен), в частности Кызылсуйской и Сиджакской террасами. Кызылсуйская терраса возвышается над поверхностью Хумсанской на 70–90 м. Поверхность ее наклонена к руслам рек, прорезается оврагами и склонами крутизной 15–30°, сложена лессовидными суглинками с конгломератами в основании. Сиджакская терраса развита отдельными участками, с более покатыми поверхностями, уступы ее мягкие, средней крутизны. Сложена она лессовидными суглинками, в отдельных местах с конгломератами в основании.

Главной гидрографической артерией на описываемой территории является левобережный приток р. Чирчик – Чимгансай с его тремя основными правобережными притоками: Аксай, Катта-Коксай, Безымянный. Чимгансай берет начало в южной части родниковой зоны «12 ключей» и является основной дренажной подземных и поверхностных вод. Вода используется для технического и хозяйственно-питьевого водоснабжения только в районе Чимгансай, где происходит основное формирование стока сая за счет родников.

Другими более значительным по водности саями являются Янгикуртан и Куласья. Реки Сулисай, Байбаксай, Джантаксай, Джоопсай являются временно действующими водотоками и дренируют подземные воды, выклинивающиеся из контактов неоген-четвертичных образований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения оползневых процессов Байбаксай-Сулисайского участка Чирчикского бассейн применены методы – картографический, геоинформационного моделирования и пластики рельефа. Необходимые материалы были собраны из различных источников: осуществлен сбор и анализ соответствующей литературы, изучены топографические и геологические карты района исследования (основное внимание было уделено возрасту образований и их литологии), рассмотрены тектонические условия (наличие разрывных нарушений различного порядка), геоморфологические характеристики (экспозиция, высота и форма склонов), гидрологические условия (наличие поверхностных водотоков, как искусственных, так и естественных), проанализированы факторы, вызывающие оползни и др.

Морфометрические показатели рельефа наряду с другими факторами (хозяйственная деятельность человека, растительный покров, нерегулированность поверхностного стока, снижение местного базиса эрозии, боковая эрозия и др.) оказывают большое влияние на возникновение оползней.

В последние годы изучение особенностей рельефа территории и его влияния на различные процессы и явления в основном базируется на построении и анализе цифровой модели рельефа (ЦМР) [Dattilo, Spezzano, 2003; Evans, 2003; Dinesh, Ahmad Fadzil, 2007; Смирнова, Кирсанов, 2021; etc.]. Под ЦМР обычно понимают непрерывное цифровое представление топографической поверхности в виде регулярной сети ячеек. Основными источниками данных для построения такой модели служат аэрофотосъемка, космосъемка, полевые работы, гидролокационные съемки и др.

ЦМР позволяют не только визуализировать рельеф в виде трехмерной поверхности (как на главном изображении) или в плоском двумерном виде (как на топографической карте), но с помощью ее вычисляются различные морфометрические параметры рельефа, такие как уклон поверхности, экспозиция и кривизна склонов, что актуально при прогнозировании оползневых процессов [Берлянт, 2002; Самсонов, 2008; Минченко, 2019; Zebker, Goldstein, 1986; Ray et al., 2020]. ЦМР в основном строятся по данным космической радарной съемки. Нами были использованы материалы спутниковой съемки SRTM и QuickBird [Глушков и др., 2002; Hanssen, 2001].

На сегодняшний день модель SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission – радиолокационная топографическая миссия шаттла) является одной из самых используемых ЦМР, которая использует фазовые компоненты радиолокационного сигнала, отраженного от поверхности Земли. Точность выявления высотной компоненты SRTM может составлять меньше метра, причем в зависимости от характера местности и уровня шумов сигнала она может меняться. При этом мультиспектральные и текстурные характеристики, большое количество циклов повторного наблюдения, обширный охват территории и высокое пространственное разрешение позволяют применять радарные снимки SRTM для определения высотных отметок территории, построения горизонталей, необходимых профилей местности, объемной модели рельефа и др. [Hanssen, 2001]. Данные SRTM находятся в общем доступе на сайте EarthExplorer¹, который принадлежит Геологической службе США (USGS).

Снимки *QuickBird*, имея высокие пространственные разрешения цифровых изображений земной поверхности, поставляются как панхроматические и мультиспектральные, так и в синтезированном виде (Pan-sharpened, цветной снимок высокого разрешения). Снимки обладают хорошими дешифровочными свойствами. При

¹ Электронный ресурс: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 10.04.2022)

наличии качественной ЦМР они могут рассматриваться как альтернатива аэро съемке для обновления планов масштаба вплоть до 1:2 000. Имеется доступный для просмотра архив с уменьшенными копиями снимков.

Метод пластики рельефа позволяет с высокой степенью точности обнаружить территории, с которых концентрируются в определенном водосборном русле твердый и жидкий сток, оконтурить и показать водоразделы, террасы, а также установить области формирования, транзита и аккумуляции стока [Сабитова, 2002; Степанов, 2006]. В отличие от топографической карты, на которой абсолютный рельеф определяется по горизонталям, на карте пластики выделяется относительный рельеф с использованием морфоизографы. Морфоизографы – изолинии нулевой плановой кривизны, то есть линии, представляющие собой видимые границы распространения положительных и отрицательных форм рельефа, которые проводятся по точкам перегибов горизонталей, характеризующих границу смен элементов рельефа от привершинной части водосборной площади. Далее контуры повышений закрашиваются. В результате на карте пластики рельефа создается выпукло-вогнутая поверхность с естественными ареалами – «динамическими потоками» [Степанов, 2006; Степанов и др., 2009]

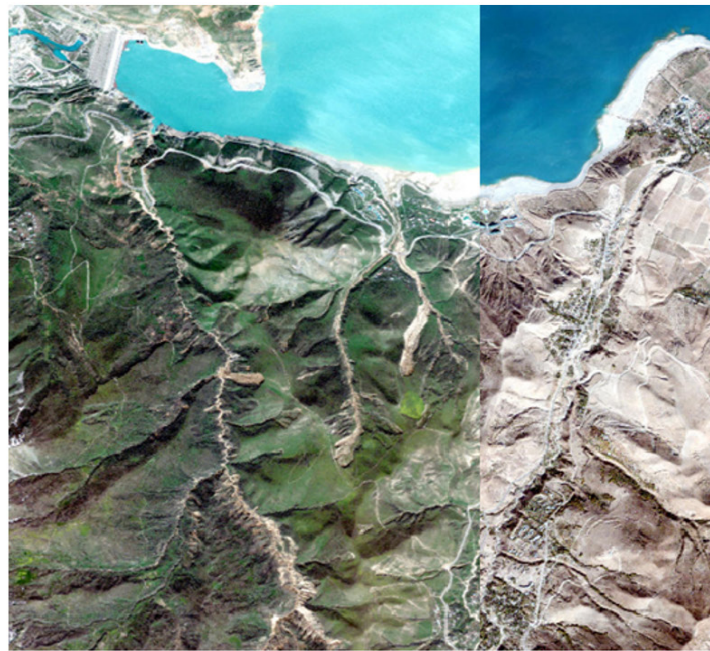
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Существует два основополагающих фактора, определяющих региональные особенности распространения оползневых процессов, среди них геологическое строение и климатические особенности района исследования [Сабитова и др., 2018; Сабитова и др., 2020]. Кроме того, в формировании оползней немаловажную роль играет рельеф местности (форма склона, высота), сложившийся на данной территории. Влияние может быть прямым и косвенным. Прямое влияние оказывают высота и крутизна склонов и откосов (искусственно созданных склонов), их форма. Чем больше высота и крутизна склонов, тем более благоприятные условия создаются для образования оползней, тем больше объемы оползней. При прочих равных условиях наиболее устойчивыми являются вогнутые склоны и менее устойчивыми – выпуклые и нависающие. Косвенное воздействие рельефа проявляется в распределении количества осадков, температуры, циркуляции воздуха, растительного покрова, поверхностных и подземных вод [Емельянова, 1972; Ниязов, 2009].

Известно, что высотные отметки выступают одним из оползнеформирующих факторов. Поэтому установление диапазона абсолютных высотных отметок рельефа Байбаксай-Сулисайского участка имеет значение в прогнозировании оползневых процессов. Здесь абсолютные отметки достаточно хорошо видны на карте горизонталей, сгенерированной в программе Global Mapper с использованием материалов *SRTM* (рис. 1).

Радарные спутниковые данные позволили также внести некоторые корректировки в топографические планшеты, построенные более десятка лет назад и не всегда, к сожалению, отражающие реальные показатели высотных отметок. При этом диапазон высот колеблется в пределах от 304 м до 3000 м и более по региону, и от 735 м до 1800 м в пределах Сулисай-Байбаксайского бассейна (рис. 2).

Крутизна склонов по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) составляет от 13,8° до 41,65° (рис. 3).



0 20 Kilometers

(a)



0 20 Kilometers

(b)

Рис. 1. Сулисай-Байбаксайский бассейн (а) и карта горизонталей (б), сгенерированная в программе GlobalMapper с использованием снимков SRTM.
Fig. 1. Sulisai-Baibaksai basin (a) and contour map (b) generated in the GlobalMapper program using SRTM images.

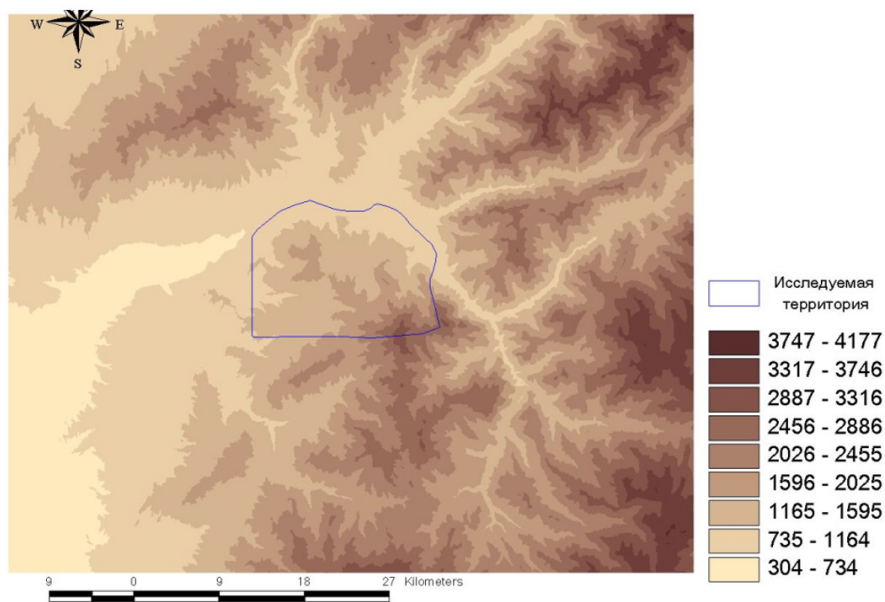


Рис. 2. Градиентная карта абсолютных отметок над уровнем моря, сгенерированная по данным SRTM в среде ГИС.
 Fig. 2. Gradient elevation map generated from SRTM data in a GIS environment.

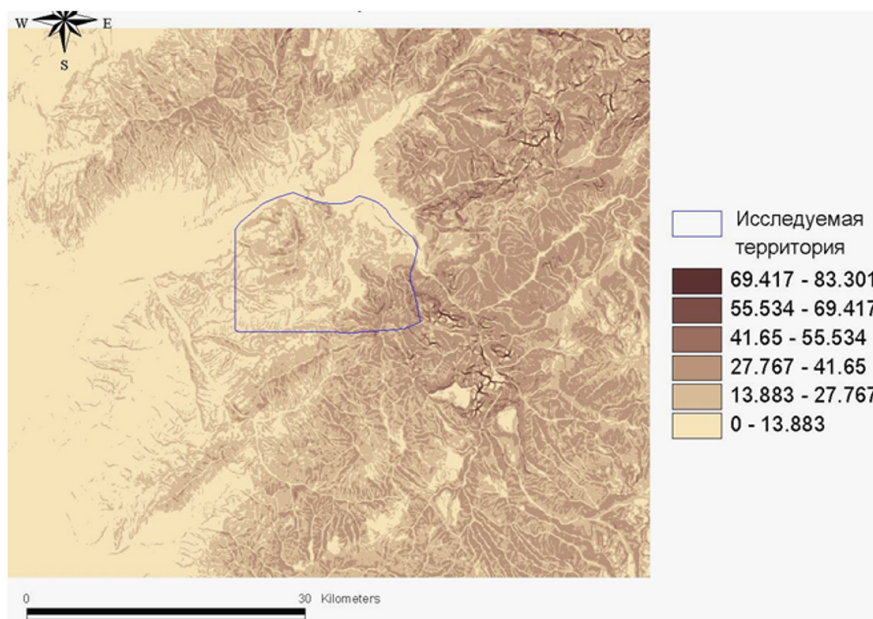


Рис. 3. Градиентная карта крутизны склонов по данным SRTM в среде ГИС.
 Fig. 3. Slope gradient map generated from SRTM data in a GIS environment.

Условиями развития оползней является также наличие склонов определенной крутизны и нарушение равновесия склона. Если крутизна склона превышает угол естественного откоса, возникающий в ходе выветривания слагающих его коренных пород, обломочный материал не задерживается на его поверхности. В связи с этим, для Сулисай-Байбаксайского участка был учтен этот момент при выполнении расчетов и составлении космокарт вероятностей активизации оползней в зависимости от фактора крутизны склонов. Полученные результаты показывают, что в исследуемом участке экспозиция склонов колеблется в достаточно широких пределах.

Используя спутниковые данные SRTM, было определено, что диапазон изменения экспозиции склонов составляет от 40° до 280°, что характеризует ориентированность склонов от северной и северо-восточного до западно-северо-западного направления.

Однако основное преимущественное положение в Сулисай-Байбаксайском участке занимают склоны северо-восточной, и частично, юго-западной экспозиции (рис. 4).

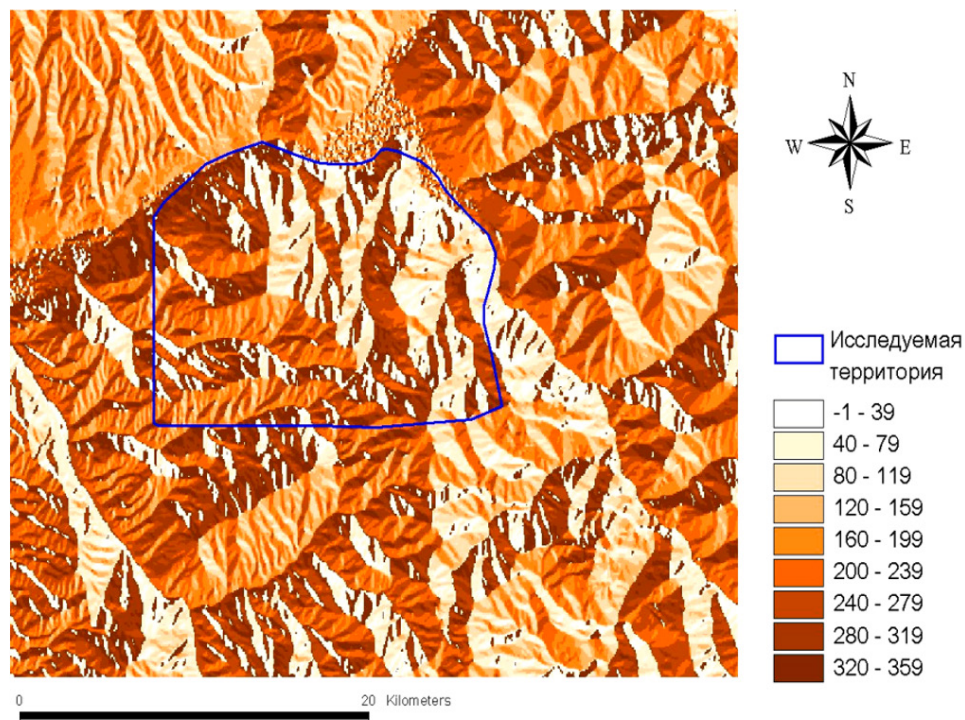


Рис. 4. Градиентная карта экспозиции склонов по данным SRTM в среде ГИС.
Fig. 4. Gradient slope exposure map generated from SRTM data in a GIS environment.

При этом преимущественно имеющие северо-восточную ориентированность склоны находятся в более увлажненном состоянии по сравнению со склонами другой экспозиции. Это увеличивает долю вероятности активизации оползневых процессов на этих склонах, связанных с большей увлажненностью масс.

Другим немаловажным аспектом в качестве оползнеформирующего фактора выступает форма склонов в плане и профиле. Эти параметры иногда достаточно сложны для выяснения в полевых условиях. Этот вопрос можно решить с помощью снимков спутниковой системы *QuickBird*.

В результате радарных снимков спутниковой съемки *QuickBird* для Сулисай-Байбаксайского участка были выявлены основные формы с достаточной точностью. Ниже представлена детальная цифровая космокарта экспозиции склонов Сулисай-Байбаксайского участка (рис. 5).

Данные со спутника *QuickBird* позволяют создавать высокоточные модели рельефа при использовании стереопарных снимков. Для района исследования была построена цифровая модель рельефа (ЦМР) (рис. 6).

На основании цифровой модели рельефа создана карта пластики рельефа Сулисай-Байбаксайского участка (рис. 7). Как видно из рисунка 7, горизонтали указывают понижения и повышения, а линия морфоизографа, соединяющая все точки с нулевой плановой кривизной горизонталей с образованием единого каркаса – векторной выпуклой поверхности – потока [Сабитова, 2002].

Морфоизографы были проведены по изгибам горизонталей, с учетом уклона местности, а выпуклости (затенены) и вогнутости (остались светлыми) оформляли с использованием инструментария ГИС. При этом вогнутости образуют нижнюю часть выпуклостей потоков, их подошву или, иначе, подложку, по которой совершают идеализированное движение потоки. В результате, потоки образуют литодинамическую

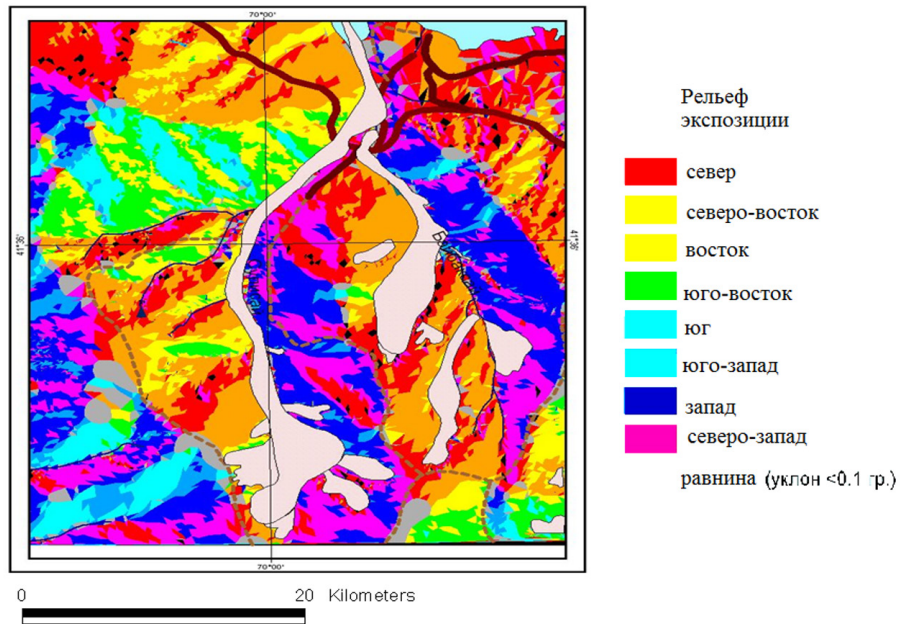


Рис. 5. Цифровая космокарта экспозиции склонов по данным QuickBird в среде ГИС.
 Fig. 5. Digital space map of slope exposure according to QuickBird data in a GIS environment.

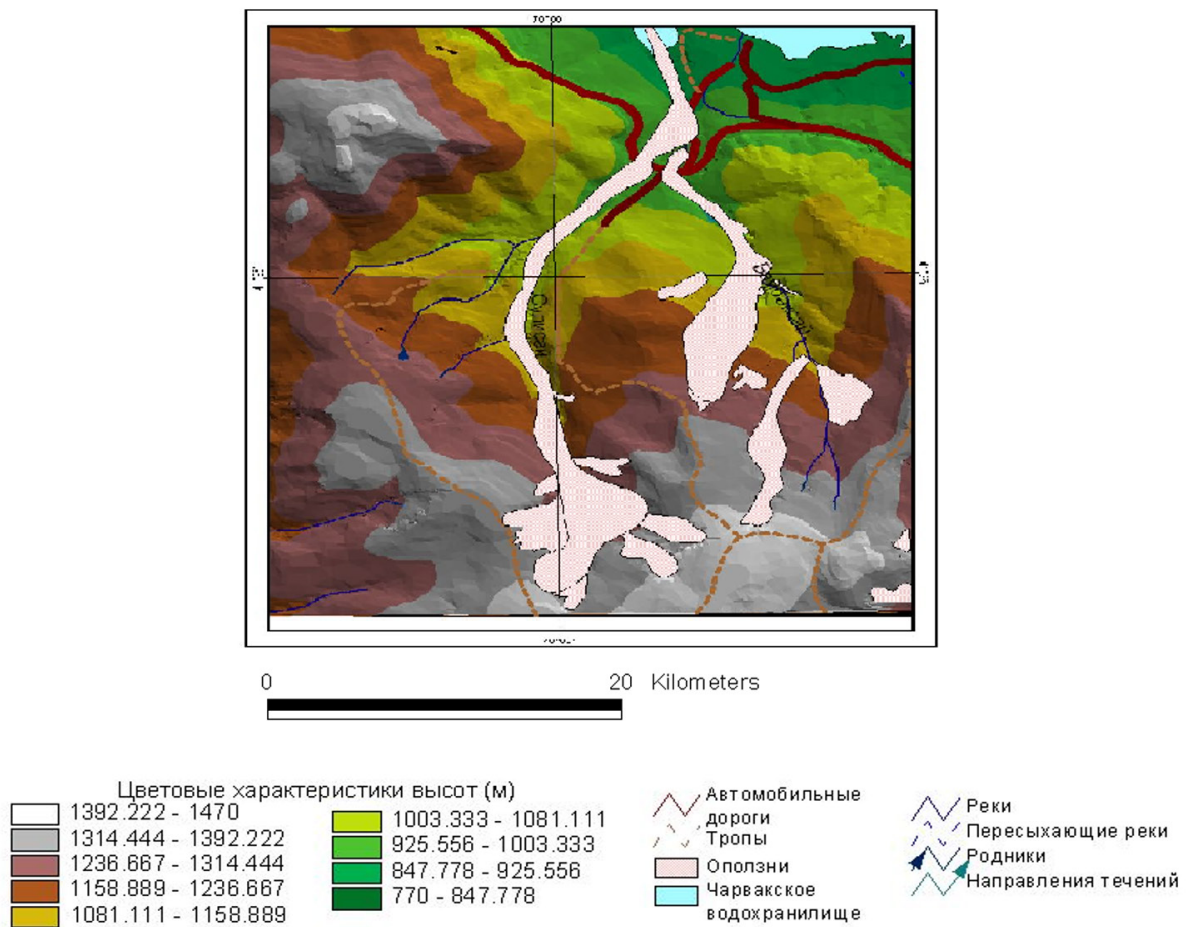


Рис. 6. Цифровая модель рельефа, созданная на основе обработки данных QuickBird.
 Fig. 6. Digital elevation model created on the basis of QuickBird data processing.

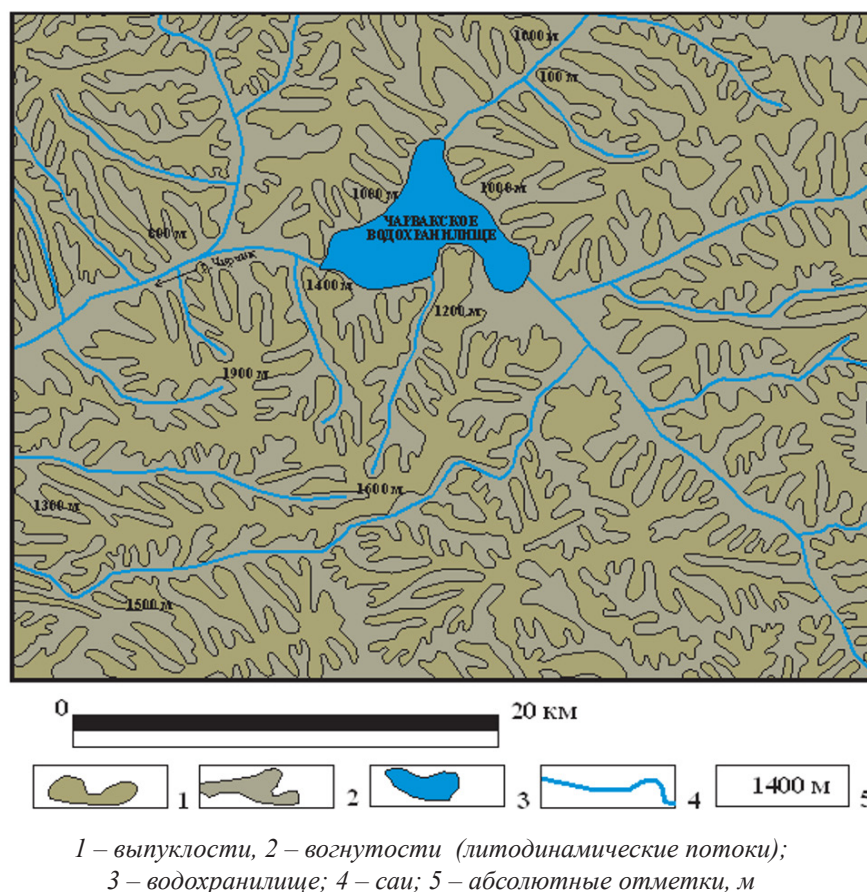


Рис. 7. Карта пластики рельефа, составленная на основе карты горизонталей, сгенерированная в программе GlobalMapper с использованием снимков SRTM.

Fig. 7. Relief plastic map, compiled on the basis of the contour map, generated in the GlobalMapper program using SRTM images.

потоковую систему земной поверхности склонов Сулисай-Байбаксайского участка, которая имеет древовидную форму, напоминающую геометрические фракталы. При этом изучались особенности рельефа местности по топографической карте и другим литературным источникам. Далее была составлена дополнительная цифровая карта, содержащая конечные понижения (западины, блюдца, овраги и др.) и повышения (холм, гора, седловина и др.) в виде полигональных объектов цифровой карты, линии водоразделов и тальвегов в виде линейных объектов.

ВЫВОДЫ

Исследуемая территория характеризуется весьма сложными инженерно-геологическими условиями. Это обусловлено наличием мощной толщи лессовых пород, непростыми гидрогеологическими условиями, а также расчлененностью рельефа, что предопределило развитие склоновых процессов.

Результаты ГИС-моделирования на основе составленных ЦМР и карты пластики рельефа позволили оценить устойчивость Байбаксай-Сулисайского участка к оползням. На карте с изображением литодинамических потоков выделяются участки возможных проявлений оползневых процессов. Обобщение результатов исследований позволяет отметить, что наиболее подверженные активизации оползневых процессов площади имеют следующие характеристики: абсолютные высотные отметки от 950 до 1300 м над уровнем моря, склоны крутизной от 15° до 25°, склоны северной и северо-восточной экспозиции, площади, на которых развиты породы раннего неогена, места выходов подземных вод на дневную поверхность и территории развития тектонических нарушений.

С другой стороны, наименее подверженные активизации оползневых процессов площади имеют следующие характеристики: абсолютные высотные отметки от 850 до 900 и свыше 1600 м над уровнем моря, склоны крутизной от 0° до 5° и свыше 30°, склоны южной, юго-восточной и юго-западной ориентированности и площади, сложенные палеозойскими, нерасчлененными палеоген-неогеновыми, меловыми, карбоновыми и некоторыми четвертичными отложениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянт А.М. Картография. М.: Аспект Пресс, 2002. 336 с.
2. Глушков В.В., Насретдинов К.К., Шаравин А.А. Космическая геодезия: методы и перспективы развития. М.: Институт политического и военного анализа, 2002. 448 с.
3. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов. М.: Недра, 1972. 310 с.
4. Минченко В.Д. Дистанционный мониторинг оползневой опасности при освоении территорий в Узбекистане. Материалы Международной научной конференции, посвященной 15-летию со дня образования ЦАИИЗ. Бишкек, Кыргызстан. Бишкек, 2019. С. 43–50.
5. Ниязов Р.А. Оползни Узбекистана (тенденции развития на рубеже XXI века). Ташкент: ГИДРОИНГЕО, 2009. 208 с.
6. Сабитова Н.И. Научные основы морфогидрогеометрического метода при решении географо-гидрогеологических задач (на примере Узбекистана и прилегающих территорий). Дис. докт. геогр. наук. Ташкент, 2002. 271 с.
7. Сабитова Н.И., Стельмах А.Г., Таджибаева Н.Р. Использование потоковых структур при оценке оползневых процессов. Известия географического общества Узбекистана, 2018. Спец. номер. С. 227–230.
8. Сабитова Н.И., Стельмах А.Г., Таджибаева Н.Р. Картографирование оползней и оползневых процессов Узбекистана методом пластики рельефа (на примере Чирчикского бассейна). ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы международной конференции. М.: Изд-во Московского университета, 2020. Т. 26. № 1. С. 572–583. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-1-26-572-583.
9. Самсонов Т.Е. Алгоритм автоматизированного изображения рельефа способом штрихов крутизны. Вестник Московского университета, 2008. Серия 5: География. № 3. С. 49–54.
10. Смирнова И.О., Кирсанов А.А. Состояние и перспективы использования данных дистанционного зондирования при изучении экзогенных геологических процессов на примере оползней. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2021. Т. 18. № 3. С. 26–48.
11. Степанов И.Н. Теория пластики рельефа и новые тематические карты. М.: Наука, 2006. 230 с.
12. Степанов И.Н., Степанова В.И., Баранов И.П., Винокуров И.Ю. Потоки карт пластики рельефа – физико-математические экологические системы. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2009. Т. 11. № 1-7. С. 1581–1586.
13. Dattilo G., Spezzano G. Simulation of a cellular landslide model with Camelot on high performance computers. Parallel Computation, 2003. V. 29. No. 10. P. 1403–1418. DOI: 10.1016/j.parco.2003.05.002.
14. Dinesh S., Ahmad Fadzil M.H. Characterization of the Size Distribution of Mountains Extracted from Multiscale Digital Elevation Models. Applied Mathematical Sciences, 2007. V. 7. No. 10. P. 1410–1415. DOI: 10.3923/JAS.2007.1410.1415.
15. Evans I.S. Scale-Specific Landforms and Aspects of the Land Surface. Concepts and Modelling in Geomorphology: International Perspectives, 2003. P. 61–84.
16. Hanssen R. Radar Interferometry. Data Interpretation and Error Analysis, 2001. V. 2. P. 66–69. DOI: 10.1007/0-306-47633-9.
17. Intrieri E., Frodella W., Raspini F., Bardi F., Tofani F. Using Satellite Interferometry to Infer Landslide Sliding Surface Depth and Geometry. Remote Sensing, 2020. V. 12. No. 9. P. 1462. DOI: 10.3390/rs12091462.

18. *Mandal S., Mondal S.* Statistical approaches for landslide susceptibility assessment and prediction. Switzerland: Springer International Publishing, 2019. 200 p. DOI: 10.1007/978-3-319-93897-4.
19. *Ray R.L., Lazzari M., Olutimehin T.* Remote Sensing Approaches and Related Techniques to Map and Study Landslides. Landslides – Investigation and Monitoring. IntechOpen, 2020. 24 p. DOI: 10.5772/intechopen.93681.
20. *Solari L., Bianchini S., Franceschini R., Barra A., Monserrat O., Thuegaz P., Bertolo D., Crosetto M., Catani F.* Satellite interferometric data for landslide intensity evaluation in mountainous regions. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2020. V. 87. No. 102028. DOI: 10.1016/j.jag.2019.102028.
21. *Zebker H.A., Goldstein R.M.* Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations. Journal of Geophysical Research, 1986. No. 91. P. 4993–4999. DOI: 10.1029/JB091IB05P04993.

REFERENCES

1. *Berlyant A.M.* Cartography. Moscow: Aspect-Press, 2002. 336 p. (in Russian).
2. *Dattilo G., Spezzano G.* Simulation of a cellular landslide model with Camelot on high performance computers. Parallel Computation, 2003. V. 29. No. 10. P. 1403–1418. DOI: 10.1016/j.parco.2003.05.002.
3. *Dinesh S., Ahmad Fadzil M.H.* Characterization of the Size Distribution of Mountains Extracted from Multiscale Digital Elevation Models. Applied Mathematical Sciences, 2007. V. 7. No. 10. P. 1410–1415. DOI: 10.3923/JAS.2007.1410.1415.
4. *Emelyanova E.P.* The main regularities of landslide processes. Moscow: Nedra, 1972. 310 p. (in Russian).
5. *Evans I.S.* Scale-Specific Landforms and Aspects of the Land Surface. Concepts and Modelling in Geomorphology: International Perspectives, 2003. P. 61–84.
6. *Glushkov V.V., Nasretdinov K.K., Sharavin A.A.* Space geodesy: methods and development prospects. Moscow: Institute of political and military analysis, 2002. 448 p. (in Russian).
7. *Hanssen R.* Radar Interferometry. Data Interpretation and Error Analysis, 2001. V. 2. P. 66–69. DOI: 10.1007/0-306-47633-9.
8. *Intrieri E., Frodella W., Raspini F., Bardi F., Tofani F.* Using Satellite Interferometry to Infer Landslide Sliding Surface Depth and Geometry. Remote Sensing, 2020. V. 12. No. 9. P. 1462. DOI: 10.3390/rs12091462.
9. *Mandal S., Mondal S.* Statistical approaches for landslide susceptibility assessment and prediction. Switzerland: Springer International Publishing, 2019. 200 p. DOI: 10.1007/978-3-319-93897-4.
10. *Minchenko V.D.* Remote knowledge hazard monitoring when developing territories in Uzbekistan. Proceedings of the International Scientific Conference dedicated to the 15th anniversary of the founding of CAIAG. Bishkek, 2019. P. 43–50. (in Russian).
11. *Niyazov R.A.* Landslides in Uzbekistan (development trends at the turn of the 21st century). Tashkent: GIDROINGEO, 2009. 208 p. (in Russian).
12. *Ray R.L., Lazzari M., Olutimehin T.* Remote Sensing Approaches and Related Techniques to Map and Study Landslides. Landslides – Investigation and Monitoring. IntechOpen, 2020. 24 p. DOI: 10.5772/intechopen.93681.
13. *Sabitova N.I.* Scientific foundations of the morphohydrogeometric method in solving geographic and hydrogeological problems (on the example of Uzbekistan and adjacent territories). Doctoral thesis. Tashkent, 2002. 271 p. (in Russian).
14. *Sabitova N.I., Stelmakh A.G., Tadzhibaeva N.R.* The use of flow structures in the assessment of landslide processes. Bulletin of the Geographic Society of Uzbekistan, 2018. Special issue. P. 226–229. (in Russian).
15. *Sabitova N.I., Stelmakh A.G., Tadzhibaeva N.R.* Mapping of landslides and landslide processes in Uzbekistan using relief plastics (in the example of the Chirchik basin). InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow

University Press, 2020. V. 26. No. 1. P. 572–583 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2020-1-26-572-583.

16. *Samsonov T.E.* Algorithm for automated relief imaging by the method of steepness strokes. Bulletin of Moscow University, 2008. Series 5: Geography. No. 3. P. 49–54 (in Russian).

17. *Smirnova I.O., Kirsanov A.A.* Status and prospects of using remote sensing data in the study of exogenous geological processes on the example of landslides. Modern problems of remote sensing of the Earth from space, 2021. V. 18. No. 3. P. 26–48 (in Russian).

18. *Solari L., Bianchini S., Franceschini R., Barra A., Monserrat O., Thuegaz P., Bertolo D., Crosetto M., Catani F.* Satellite interferometric data for landslide intensity evaluation in mountainous regions. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2020. V. 87. No. 102028. DOI: 10.1016/j.jag.2019.102028.

19. *Stepanov I.N.* The theory of relief plastics and new thematic maps. Moscow: Nauka, 2006. 230 p. (in Russian).

20. *Stepanov I.N., Stepanova V.I., Baranov I.P., Vinokurov I.Yu.* Flows of relief plastic maps – physical and mathematical ecological systems. Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2009. V. 11. No. 1-7. P. 1581-1586 (in Russian).

21. *Zebker H.A., Goldstein R.M.* Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations. Journal of Geophysical Research, 1986. No. 91. P. 4993–4999. DOI: 10.1029/JB091IB05P04993.
