

Д.О. Кривогуз, С.В. Малько, А.Ю. Семенова

ПРИМЕНЕНИЕ ГИС ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПОЛЗНЕВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Введение

Проблема оползневых процессов стоит остро. Проявляясь преимущественно на территории южного берега Крыма и прибрежных районах Керченского полуострова и Феодосии, они несут угрозу, при своей активизации, не только экономическому сектору – путем разрушения туристических маршрутов и маршрутов между городами-курортами, но и жизни туристов. Также при их активизации могут быть нарушены уникальные крымские ландшафты, памятники природы и достопримечательности.

Целью исследования является разработка методики и применение техники геопространственного анализа оползневой устойчивости Крыма.

Практическое применение данной работы заключается в том, что с помощью разработанной методики можно отслеживать протекание процессов оползнеобразования в регионе, сравнивать данные за определенный период времени, тем самым отслеживать динамику и производить экологическое прогнозирование ситуаций. Это может быть полезно при выполнении проектов и обоснований строительства новых инженерных и транспортных сооружений и др.

Физико-географическая характеристика района исследований

Крымский полуостров находится в южной части Российской Федерации. Со всех сторон омывается водами Черного и Азовского морей, а также озера Сиваш. С материковой частью он соединен Перекопским перешейком. От материковой части России полуостров отделен Керченским проливом.

Площадь Крымского полуострова составляет около 26,1 тыс. км². Около 70% общей территории принадлежат к ландшафтам Степного Крыма, в то время как остальные 30% – к ландшафтам горного Крыма. Почти весь полуостров сложен осадочными, частично изверженными кристаллизированными породами. Крымский горный хребет вытянут вдоль Южного берега Крыма в виде пологой, протягивающейся практически на 100 км дуги, который обычно подразделяют на 3 гряды: Главную, Внутреннюю и Внешнюю.

Материалы и методы определения потенциальных оползневых участков

В современной практике существует довольно много способов в той или иной мере определить степень устойчивости оползневых процессов. Наиболее активно используется метод Cees van Westen, который считает, что оптимальным способом нахождения уровня устойчивости является расчет весовых показателей оползневых факторов с последующей их агрегацией и нахождением ключевых драйверов [3].

Основываясь на работах Bonaventura F., Metz L., Bear-Crozier A.N. и Dou J., анализу подвергаются в основном морфометрические данные, литологические и иногда климатические [1, 2].

К основным данным относится информация, характеризующая главные параметры оползнеобразования – рельеф территории, геологические или литологические данные и показатели среднего количества осадков данной местности [1].

К дополнительным данным – сейсмические данные, свойства почв, гидрологические данные, удаленность от рек и морей, растительность, данные антропогенной деятельности, показатели плотности населения, инфраструктура.

Также существует несколько популярных автоматизированных моделей для расчета устойчивости и стабильности склонов – SHALSTAB и ANGMAR. Несмотря на их широкое распространение, они основаны всего лишь на использовании ЦМР и некоторых сопутствующих параметров, что не может в полной мере дать объективную оценку протекающим процессам.

С точки зрения Республики Крым будет более рационально использование наряду с геоморфометрическими и литологическими параметрами также антропогенных, климатических и сейсмических. Необходимость данного подхода обусловлена тем, что во многих регионах исследования данные параметры предположительно могут выходить на первый план и пренебрегать ими не представляется возможным.

Для формирования оптимального оползневого инвентаря при проведении анализа Республики Крым кажется разумным использование следующих геопространственных данных:

- Уклон поверхности (Slope).
- Кумулятивный сток (Flow accumulation).
- Среднегодовой уровень осадков (Total rainfall).
- Индекс мощности потока (Stream power index).
- Индекс шероховатости поверхности (Terrain ruggedness index).
- Землепользование (Landuse).
- Почвы (Soils).
- Сейсмическая активность (Seismic activity).
- Плотность населения (Population density).
- Уровень вегетации (NDVI).

Классификация исходных данных проводится с помощью следующих классификаторов, представленных ниже в табл. 1-11.

После проведения классификации необходимо провести расчет весовых коэффициентов, позволяющих определить степень влияния каждого фактора на процесс оползнеобразования. Площадь фактора оползнеобразования учитывается для показателей со значениями 4 и 5.

Весовой коэффициент рассчитывается по формуле:

$$w_i = \frac{s_f}{s_t},$$

где w_i – весовой коэффициент фактора оползнеобразования, s_f – площадь фактора оползнеобразования, s_t – общая площадь исследуемой территории.

Таблица 1

Классификатор для уклона поверхности

Критерий		Класс	Показатель опасности
Описание	Крутизна (°)		
Ровный	0-8	1	Очень низкий
Относительно ровный	8-15	2	Низкий
Средний	15-25	3	Средний
Крутой	25-45	4	Высокий
Очень крутой	>45	5	Очень высокий

Таблица 2

Классификатор для данных по землепользованию

Тип землепользования	Класс
Водоемы (реки, озера)	1
Лесистая местность, лесополосы	2
Смешанная растительность	3
Земли с/х оборота, голая почва	4
Селитебная зона	5

Таблица 3

Классификатор для индекса вегетации NDVI

Показатель	Класс
>0,6	1
0,6-0,4	2
0,2-0,4	3
-0,2-0,2	4
<-0,2	5

Таблица 4

Классификатор для уровня залегания почвенного слоя

Описание	Глубина (см)	Класс
Очень высокая	0-30	1
Высокая	30-60	2
Средняя	60-90	3
Глубокая	90-150	4
Очень глубокая	> 150	5

Таблица 5

Классификатор для типа почв

Тип почв	Класс
Суглинистые	1
Глинистые	2
Супесчаные	3
Тяжелая глина	4
Легкая глина	5

Таблица 6

Классификатор для индекса мощности потока

Показатель	Класс
<-0,1	1
-0,1-0,1	3
>0,1	5

Таблица 7

Классификатор индекса шероховатости поверхности

Степень шероховатости	Класс
Очень шероховатая	1
Шероховатая	2
Средняя	3
Гладкая	4
Очень гладкая	5

Таблица 8

Классификатор для кумулятивного стока

Бинарный показатель	Класс
0	1
1	5

Таблица 9

Классификатор для плотности населения

Плотность населения (на 100 м ²)	Класс
<5	1
5-10	2
10-15	3
15-20	4
>20	5

Таблица 10

Классификатор для среднегодового количества осадков

Среднегодовое количество осадков (мм)	Класс
<200	1
200-400	2
400-600	3
600-800	4
>800	5

Таблица 11

Классификатор для сейсмической активности

Сейсмическая активность (М)	Класс
<3,5	1
3,5-5	3
>5	5

Таким образом, общая формула для расчета территорий, потенциально подверженных оползневым процессам, рассчитывается по формуле:

$$PL = \sum w_i \cdot F_i,$$

где PL – потенциальные оползневые территории, w_i – весовой коэффициент фактора оползнеобразования, F_i – фактор оползнеобразования.

Данный подход позволяет в полной мере учесть все особенности, которые могут в значительной мере повлиять на активизацию процессов оползнеобразования. Его недостатком можно считать лишь направленность на понимание общей картины ситуации, так как рекомендуемые данные к использованию являются данными регионального масштаба, что затрудняет решение конкретных проблем, связанных с оползневой деятельностью выборочного оползневого

участка. С другой стороны, данный метод может себя хорошо проявить при решении проблем на уровне региона, что выражается в планировании социально-экономической и экологической деятельности.

Пространственная база данных оползневых факторов**Вертикальная кривизна**

Вертикальная кривизна – кривизна линии, образованной пересечением земной поверхности и вертикальной плоскости. Являясь производной второго порядка, она описывает градиент уклона вдоль заданного контура.

Отрицательные значения вертикальной кривизны указывают на выпуклость поверхности. Положительные значения говорят о том, что поверхность является вогнутой. Нулевые значения свойственны ровной поверхности.

Так как вертикальные вогнутые склоны приводят к усилению эрозионных процессов, то на данных склонах наблюдается повышенный уровень процессов оползнеобразования эрозионного типа. Эта ситуация характерна для территорий южного берега Крыма, Керченского полуострова и Феодосии.

Расчет вертикальной кривизны выполнялся с помощью алгоритма GRASS GIS «r.slope.aspect» (рис. 1).

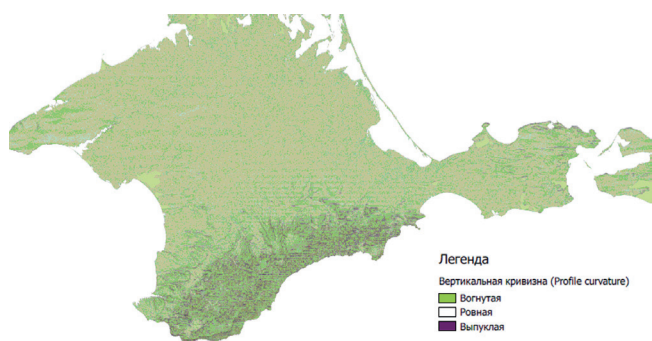


Рис. 1. Вертикальная кривизна Крымского полуострова

Горизонтальная кривизна

Горизонтальная кривизна – кривизна линии, образованной пересечением земной поверхности с плоскостью, перпендикулярной к направлению ориентации максимального градиента (экспозиции). Как производная второго порядка, горизонтальная кривизна описывает градиент экспозиции вдоль заданного контура.

Положительные значения указывают на то, что поверхность является выпуклой в заданной точке, в то время как отрицательные значения указывают на вогнутость.

Горизонтальная кривизна, наряду с вертикальной, указывает на более динамичное протекание процессов сползания горных масс в вогнутых областях склонов. Исходя из полученных данных, можно отметить, что равнинная часть Крыма имеет выпуклую и ровную поверхность, что не приводит к увеличению эрозионных процессов, а в областях горного Крыма, прибрежной части и холмогорья Керченского полуострова наблюдается вогнутость склонов Крымских гор и гребней что является одним из факторов оползнеобразования в данных регионах.

Расчет горизонтальной кривизны выполнялся с помощью алгоритма GRASS GIS «r.slope.aspect» (рис. 2).

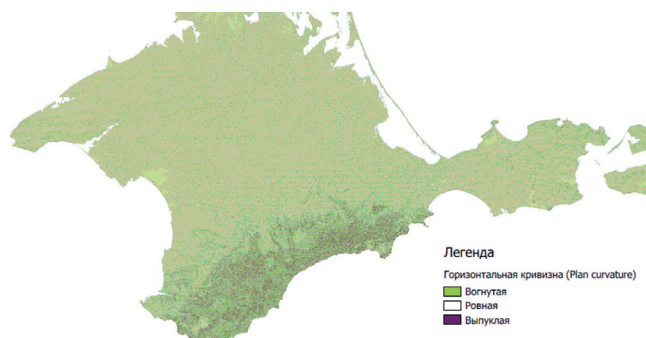


Рис. 2. Горизонтальная кривизна Крымского полуострова

Индекс мощности потока/эрозии (SPI)

Индекс мощности потока (эрозии) используется для описания потенциальной потоковой эрозии в данной точке топографической поверхности. Если площадь водосбора и величина угла уклона будут увеличиваться, количество воды, попадающей на ровные поверхности, и скорость потока будут увеличиваться, что приведет к увеличению мощности потока и усилению эрозионных процессов.

Индекс мощности потока зависит от эрозионного потенциала потоков, толщины почвенных горизонтов, содержащихся органических веществ, кислотности почв, содержания ила и песка, характера растительного покрова.

Так как индекс мощности потока зависит от величины уклона, то является как бы его следствием в части формирования параметра потенциальной потоковой эрозии. Таким образом, более высокая величина уклона, наблюдающаяся в отвесных частях Крымских гор, на побережьях, подвергшихся абразии и на гребнях Керченского полуострова формируют более высокую величину индекса.

Расчет SPI выполнялся с помощью алгоритма SAGA GIS «Stream Power Index» (рис. 3).

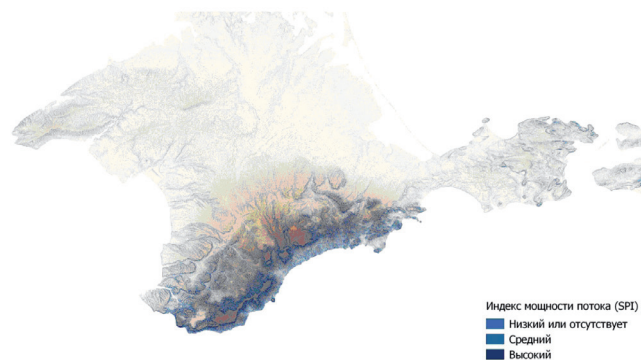


Рис. 3. Индекс мощности потока Крымского полуострова

Уклон поверхности

Уклон поверхности – угол наклона в точке пересечения между горизонтальной плоскостью и плоскостью, касательной к земной поверхности; фиксирует интенсивность перепада высот (градиент) между двумя заданными точками.

Градиентная шкала представлена цветовым переходом от зеленого цвета к красному, угол уклона поверхности изменяется от 0 до 90° соответственно. Как видно на карте, равнинная часть Крымского полуострова имеет наименьшие величины уклона поверхности, в то время как районы южного берега Крыма, непосредственно Крымских гор, северной части Керченского полуострова, гребни Керченского холмогорья, побережья Тарханкутского полуострова – наибольшие. Это может сказываться на усилении эрозионных потоков, уменьшении толщины почвенного горизонта на данных склонах, что, следовательно, ведет к невозможности произрастания густой растительности, в связи с чем незакрепленные склоны значительно сильнее подвержены сползанию масс горных пород.

Расчет углов уклона выполнялся с помощью алгоритма GRASS GIS «r.slope.aspect» (рис. 4).

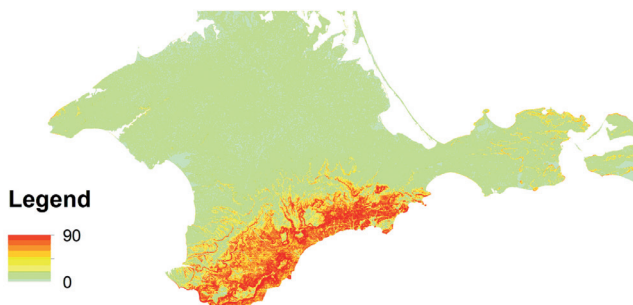


Рис. 4. Показатели углов уклона Крымского полуострова

Кумулятивный сток

Представляет собой данные о местах накопления осадков исследуемой территории.

Районы кумулятивного стока равномерно распределены практически по всей территории Крыма, за исключением южного берега, что обусловлено значительными колебаниями рельефа. В данном районе происходит активное накопление осадков, что потенциально может привести к подмыванию оползневых склонов и активизации оползневых процессов.

Расчет кумулятивного стока выполнялся с помощью алгоритма SAGA GIS «Flow Accumulation (Parallel)» (рис. 5).

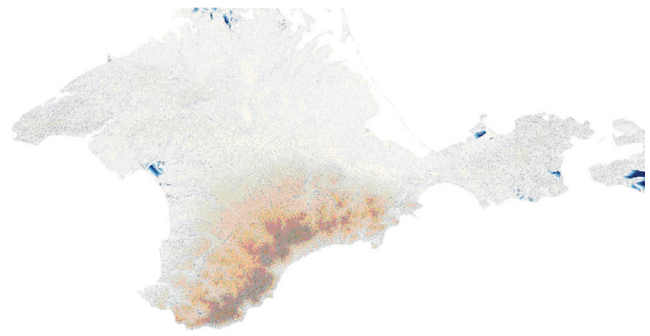


Рис. 5. Кумулятивный сток Крымского полуострова

Уровень сейсмичности

Показатель уровня сейсмичности может оказывать огромный вклад в активизацию процессов оползнеобразования. Для Крымского полуострова наиболее значительный вклад сейсмичность оказывает в некоторых участках Крымских гор, районе Феодосии и восточной части Керченского полуострова.

Расчет уровня сейсмичности выполнялся с помощью интерполяции имеющихся значений по методу IDW, с помощью инструмента ArcGIS 10.3 «Inverse Distance Weighted (IDW)» (рис. 6).

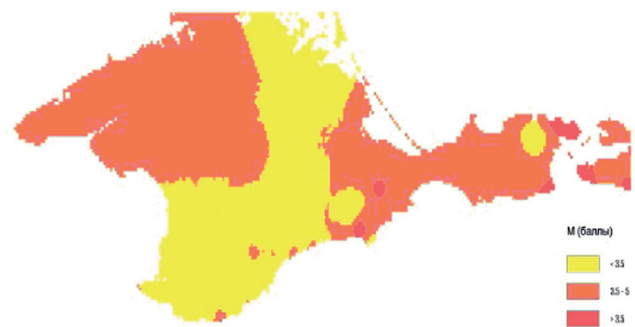


Рис. 6. Уровень сейсмичности Крымского полуострова

Плотность населения

Распределение плотности населения по всему полуострову не равномерно. Наибольшая плотность проявляется в прибрежных районах южной и восточной части полуострова. Это характерно для таких городов, как Симферополь, Керчь, Севастополь, Феодосия и курортных городов южного берега Крыма (рис. 7).

Следует отметить, что эти данные не учитывают значительное увеличение населения в летнее время, что обусловлено туристической направленностью полуострова. Поэтому вклад городов южного берега Крыма может быть значительно больше, и нагрузка на определенные участки территории,

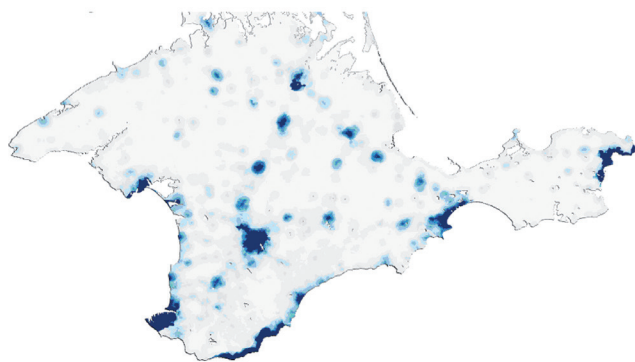


Рис. 7. Плотность населения Крымского полуострова (2015 год)

связанные с постоянными транспортными перемещениями населения, может увеличиться. Фактор, учитывающий плотность населения, может влиять как на причины проявления оползнеобразования и увеличения динамики данных процессов, так и на последствия и риски, вызванные сползаниями оползней в местах с наибольшей плотностью населения, нанося натуральный или материальный ущерб. Увеличение оползней антропогенного типа характерно для районов с массовой застройкой, особенно в прибрежной части южного берега Крыма, за счет развития туристической сети и строительства все новых зданий и сооружений как рекреационного значения, так и частного пользования.

Землепользование

Распределение классифицированных категорий землепользования выглядит неравномерным для территории Крымского полуострова. Это обусловлено экономической направленностью районов и физико-географическими характеристиками (рис. 8). Так, благоприятный 2-й класс, характеризующийся древесной и смешанной растительностью, которая способна удерживать оползневые

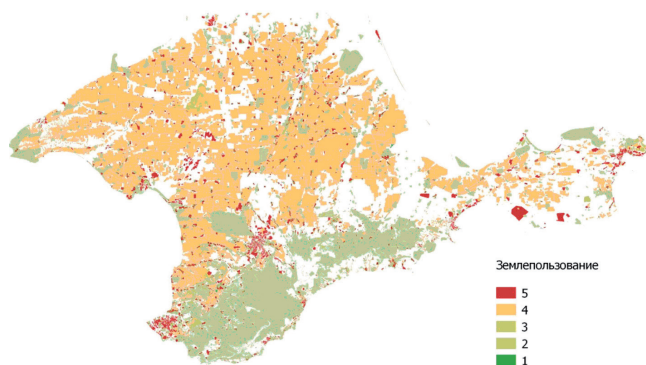


Рис. 8. Распределение типов использования земельных ресурсов Крыма

склоны от активизации оползневых процессов, в основном наблюдаются в горном Крыму, районе Евпатории, вблизи Симферополя и на севере Керченского полуострова. С другой стороны, 4-й класс, представленный сельскохозяйственными землями и голой почвой, расположен в центральной и северо-западной части полуострова. 5-й класс, характерный для урбанизированных территорий, приурочен к городским и сельским поселениям.

Общее количество осадков

Осадки на территории полуострова распределены практически равномерно. Выражается их явное малое количество по всей территории – не более 500 мм в год. Исключение в данном случае составляет горный Крым, где среднегодовое количество осадков равняется около 2500 мм год.

Расчет среднегодового уровня осадков выполнялся с помощью интерполяции имеющихся значений по методу IDW, с помощью инструмента ArcGIS 10.3 «Inverse Distance Weighted (IDW)» (рис. 9).

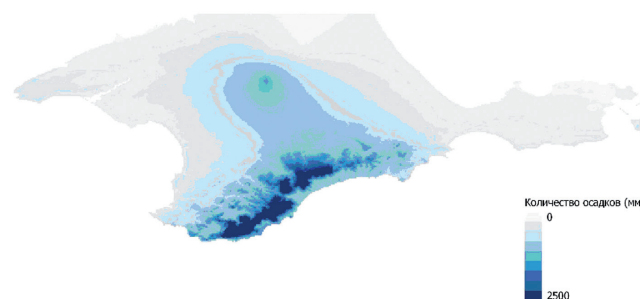


Рис. 9. Среднегодовой уровень осадков Крымского полуострова

Почвы

Почвы Крыма разнообразны. По данным FAO, наиболее преобладающими являются черноземы, которые расположены по центру полуострова, дерново-подзолистые и подзолистые (рис. 10).

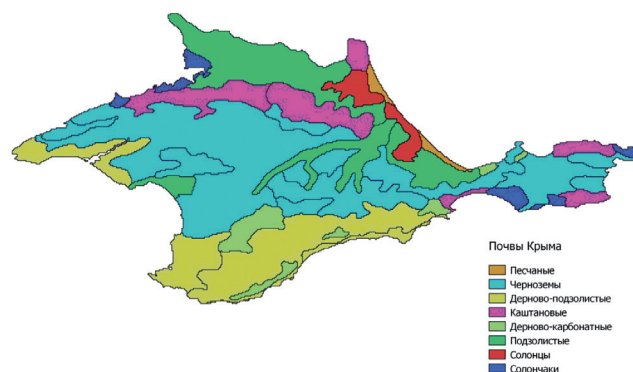


Рис. 10. Почвы Крыма (по данным FAO)

Результаты и выводы

Проблема оползневых процессов стоит для Крыма особо остро. Рассматривая вклад различных оползневых факторов, основываясь на их весовых коэффициентах, можно выделить те, которые оказывают на протекание этих процессов наиболее значительное влияние (рис. 11, табл. 12).

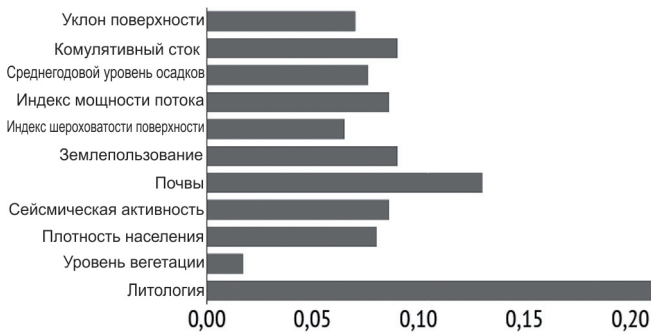


Рис. 11. Распределение весовых коэффициентов процесса оползнеобразования

Таким образом, наибольший вклад вносят такие факторы как литологические характеристики и почвенный состав. Так же следует брать во внимание кумулятивный сток атмосферных осадков.

Согласно проведенным исследованиям, наиболее потенциально опасные районы приурочены к районам Южного берега Крыма, Керченского полуострова и города Феодосии (рис. 12).

Следует отметить, что на Керченском полуострове районы активизации оползневых процессов в основном располагаются на побережье и занимают по сравнению с Южным берегом Крыма значительно меньшую площадь.

Эти районы характеризуются наличием большого количества редких и исчезающих представителей флоры и фауны. Так, к примеру, некоторые потенциально опасные в оползневом отношении территории Крыма являются местообитанием для таких редких видов птиц, как *Aythya nyroca*, *Vucrophala clangula*, *Phalacrocorax aristotelis*, *Ardeola ralloides*, *Falco peregrinus* и других [4].

Уничтожение их ареалов обитания вследствие активизации оползневых процессов может не только привести к утрате уникальных видов орнитофауны, но и в целом к уменьшению туристической привлекательности региона [4].

Также особую опасность представляет разрушение дорожной сети, что может привести не только к затруднению туристического потока в горной местности и курортных районах, но и к значительным человеческим жертвам, поскольку наибольший туристический поток приходится именно на эти районы [4].

Решением данной проблемы видятся не только технические мероприятия по укреплению оползневых склонов, но и грамотное планирование туристических маршрутов для снижения на них транспортной нагрузки, а также влияния автотранспорта и строительных работ.

Таблица 12

Вес факторов процесса оползнеобразования Крымского полуострова

Оползневой фактор	Вес фактора
Уклон поверхности	0,07
Кумулятивный сток	0,09
Среднегодовой уровень осадков	0,076
Индекс мощности потока	0,086
Индекс шероховатости поверхности	0,065
Землепользование	0,09
Почвы	0,13
Сейсмическая активность	0,086
Плотность населения	0,08
Уровень вегетации	0,017
Литология	0,21
Всего	1

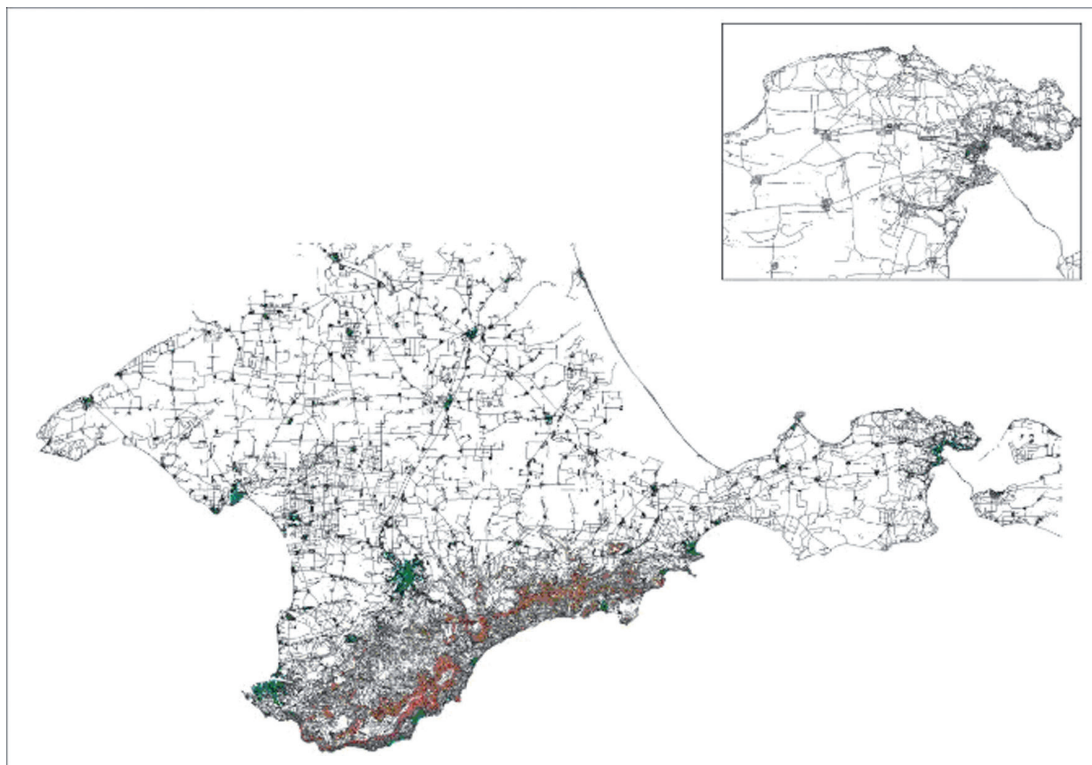


Рис. 12. Потенциальные районы активизации оползневых процессов Республики Крым (красным) и транспортная сеть (бирюзовым)

Заключение

В заключение можно сказать, что оползневая обстановка в Крыму довольно напряженная. Территории, подвергнутые потенциальным оползневым процессам, затрагивают важнейшие маршруты туристических потоков. Проведенное исследование показывает, что наибольший вклад в процессы оползнеобразования вносит геологический и почвенный фактор, что ставит под сомнение полную ликвидацию самих процессов. Оптимальным, с нашей точки зрения, выглядит или сдерживающие решения (возведение защитных сооружений, укрепление склонов и др.), или смена логистики, выраженная в перенаправлении дорожной сети по более безопасным маршрутам. В районе Керченского полуострова ситуация выглядит более оптимистической из-за приуроченности потенциальных оползневых районов к прибрежной части и их небольшого числа.

Разработанная методика на основе применения техники геопространственного анализа оползневой устойчивости с помощью литологических, морфометрических и гидрологических факторов позволяет в полной мере определить степень влияния каждого фактора на процесс оползнеобразования и получить сведения о территориях, потенциально подверженных оползневым процессам. Этим способом была произведена оценка территории Крымского полуострова, которая, как известно, благодаря своим

геологическим (литологическим, почвенным) и сейсмическим особенностям подвержена значительному оползнеобразованию.

Ключевые слова: геоинформационные технологии, геоинформационные системы, процессы оползнеобразования, оползневые факторы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Metz L., Bear-Crozier A.N. Landslide susceptibility mapping: A remote sensing based approach using QGIS 2.2 (Valmiera) / L. Metz, A.N. Bear-Crozier. – Canberra : Geoscience Australia, 2014. – 100 с.
2. Wahono B.F.D. Applications of Statistical and Heuristic Methods for Landslide Susceptibility Assessments: A case study in Wadas Lintang Sub District, Wonosobo Regency, Central Java Province, Indonesia, 2010. – 106 с.
3. Кривогуз Д.О. Применение метода двумерного статистического анализа для определения оползневой чувствительности восточной части Керченского полуострова // Научная дискуссия: инновации в современном мире. – 2015. – № 12-2 (43). – С. 7-12.
4. Кривогуз Д.О., Малько С.В., Семенова А.Ю. Оползневая деятельность, как угроза устойчивому развитию Республики Крым // Технические науки – от теории к практике : сб. ст. по матер. LVII междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск : СибАК. – 2016. – № 56. – С. 7-12.