

УДК 551.4.042

© А.А. Вожик, Д.А. Шамурзаева

*А.А. Вожик, Д.А. Шамурзаева*

# ОПЕРАТИВНОЕ РЕГИОНАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АКТИВНОСТИ ОПОЛЗНЕВОГО ПРОЦЕССА НА ПРИМЕРЕ СОЧИНСКОГО ПОЛИГОНА

## Введение

Несмотря на научно-технический прогресс, защищенность людей на Земле от экзогенных геологических процессов не возрастает. Более того, отмечается постоянный рост материального ущерба от их воздействий. Основной причиной таких неблагоприятных изменений является нерегулируемый рост населения планеты и количества крупных городов, а также усиление техногенного воздействия на окружающую среду [2].

Наиболее неблагоприятным из экзогенных геологических процессов является оползневый процесс, который развивается в виде внезапных и кратковременных событий, наносящих значительный материальный ущерб и приводящих к гибели людей.

Необходимо изменить стратегию, отдав приоритет мерам по прогнозу и предупреждению катастроф, а мероприятия по ликвидации их последствий рассматривать как вынужденные и безальтернативные действия [2].

На территории муниципального образования города-курорта Сочи оползни имеют значительное распространение. Их развитию способствуют природные и техногенные факторы. В рамках ведения государственного мониторинга состояния недр по подсистеме «опасные экзогенные геологические процессы» наблюдения за оползневым процессом проводятся в пределах Сочинского полигона, который был организован в 2009 г. Государственный мониторинг состояния недр представляет собой систему регулярных наблюдений, сбора, накопления, обработки и анализа информации, оценки состояния геологической среды и прогноза ее изменений под влиянием природных и техногенных факторов. Для предотвращения последствий, вызванных негативными воздействиями оползневой активности на различные объекты, наибольшее значение имеет прогнозирование процесса.

Прогнозы оползневой активности делятся на временные и пространственные. Пространственные прогнозы направлены на оценку распространения оползней в различных частях исследуемых терри-

торий, а основной задачей временных прогнозов является определение времени активизации процесса.

Временные прогнозы по отношению к сроку прогнозирования подразделяются на следующие:

- 1) исторические (вековые) на 100 и более лет;
- 2) долгосрочные (многолетние) на 5-10 и до 20 лет;
- 3) краткосрочные (на предстоящий год или процессоопасный сезон);
- 4) оперативные (на периоды развития катастрофических ситуаций).

По отношению к пространству выделяют следующие прогнозы:

- 1) региональные прогнозы (масштаб исследований: 1:200 000 – 1:1 000 000);
- 2) субрегиональные прогнозы (масштаб исследований: 1:25 000 – 1:100 000);
- 3) локальные прогнозы (масштаб исследований: 1:2 000 – 1:10 000).

Региональные прогнозы, которые составляются для больших территорий, являются «фоновыми». Такие прогнозы служат основой для разработки более детальных субрегиональных и локальных прогнозов. Методы локальных прогнозов оползневой активности направлены на решение задач, связанных с единичными проявлениями процесса, как правило, на относительно небольших площадях.

Задачей настоящей работы является создание методики оперативного регионального прогноза оползневой активности и ее апробация на примере Сочинского полигона. Прогнозы, разработанные с использованием указанного методического подхода, позволяют определять конкретное местоположение районов возможной активизации, степень прогнозируемой активности и, что особенно важно, время возможной активизации оползневой активности.

## Методика сбора и обработки информации и оперативного регионального прогноза оползневой активности

Оперативный региональный прогноз оползневой активности имеет временную и пространственную

составляющие. В качестве пространственной основы прогнозирования используется карта оползневой опасности. Методика составления карт оползневой опасности основана на количественном учете влияния природных и техногенных факторов на распределение оползней. Карта оползневой опасности составляется на основе районирования по интегральному показателю. Интегральный показатель оползневой опасности в каждой точке изучаемой территории определяет степень потенциальной подверженности территории оползневому процессу [1].

Установление набора основных факторов определяется масштабом исследований и наличием исходной информации, а также генетическим типом экзогенных геологических процессов. Необходимый объем информации может быть получен по материалам геологических, гидрогеологических и инженерно-геологических съемок, геоморфологических, климатических, сейсмических и других карт, а также ранее выполненных детальных, в том числе режимных, исследований [1].

Составление карты оползневой опасности осуществляется по следующему алгоритму:

1. Составление карты проявлений оползневой опасности.
2. Инженерно-геологическое районирование территории.
3. Определение набора факторов, обуславливающих развитие оползневой опасности, разбиение их на классы.
4. Оценка влияния отдельных факторов на развитие оползневой опасности и уточнение набора факторов для расчета оползневой опасности.
5. Составление карты оползневой опасности.

Составление карты проявлений оползневой опасности для рассматриваемой территории выполняется с использованием различных источников информации. Векторизация растровых и редактирование векторных данных о проявлениях оползневой опасности выполняются с использованием ГИС.

На стадии инженерно-геологического районирования по тектоническому или геоморфологическому признакам выделяются инженерно-геологические таксоны, которые рассматриваются как системы с присущими им типичными особенностями развития оползневой опасности. Анализ связи распространения оползней и различных факторов производится отдельно для каждого инженерно-геологического таксона.

Далее, с учетом опыта проведенных ранее исследований и имеющихся фактических данных, определяется набор факторов, обуславливающих развитие оползневой опасности. Затем каждый

фактор разбивается на классы. Карты распространения классов факторов строятся в векторном виде (для факторов, классы которых имеют качественную характеристику) или в растровом (для данных, имеющих непрерывные значения, в том числе построенных с использованием ГИС). Для факторов, имеющих непрерывные значения, строятся гистограммы распределения, и с их помощью определяются интервалы классов.

Для оценки влияния отдельных факторов на развитие оползневой опасности используется коэффициент Крамера [3], который изменяется в диапазоне от 0 до 1. Чем ближе значения коэффициента Крамера к 1, тем сильнее влияние фактора на развитие оползневой опасности. Коэффициент Крамера рассчитывается с использованием таблиц сопряженности по следующей формуле:

$$V^2 = \frac{\chi^2}{n \cdot \min(r-1, s-1)}, \quad (1)$$

где  $n$  – объем выборки;  $r$  и  $s$  – количество строк и столбцов в таблице сопряженности;  $\min(r-1, s-1)$  – минимальное значение из двух чисел  $(r-1)$  и  $(s-1)$ ;  $\chi^2$  – критерий согласия, который рассчитывается по следующей формуле:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \frac{\left( n_{ij} - \frac{n_{i\cdot} \cdot n_{\cdot j}}{n} \right)^2}{\frac{n_{i\cdot} \cdot n_{\cdot j}}{n}}, \quad (2)$$

где  $n_{ij}$  – частоты в таблице сопряженности;  $n_{i\cdot}$  и  $n_{\cdot j}$  – маргинальные частоты в таблице сопряженности;  $n$  – объем выборки;  $r$  и  $s$  – количество строк и столбцов в таблице сопряженности. Частота  $n_{ij}$  определяется как площадь класса вероятности возникновения оползневой опасности ( $Y_{ij}$ ) в пределах класса фактора ( $X_j$ ). Маргинальные частоты определяются как суммы частот, расположенных в строках ( $n_{i\cdot}$ ) или столбцах ( $n_{\cdot j}$ ) таблиц сопряженности.

Факторы, имеющие низкие значения коэффициента Крамера (или весового коэффициента) и, соответственно, незначительно влияющие на развитие оползневой опасности, исключаются из анализа.

Для построения карты оползневой опасности рассчитывается интегральный показатель по следующей формуле:

$$I = \sum_{i,j=1}^n w_j \cdot p_{ij}, \quad (3)$$

где  $w_j$  – весовой коэффициент  $j$ -го фактора, нормированный таким образом, чтобы сумма весовых коэффициентов всех факторов равнялась 1;  $p_{ij}$  – вероятность возникновения оползневой опасности

в пределах  $i$ -го класса  $j$ -го фактора, которая рассчитывается по формуле:

$$P_{ij} = \frac{S_{ij}}{F_{ij}}, \quad (4)$$

где  $S_{ij}$  – суммарная площадь проявлений оползневой опасности в пределах  $i$ -го класса  $j$ -го фактора;  $F_{ij}$  – площадь  $i$ -го класса  $j$ -го фактора.

В пределах различных инженерно-геологических таксонов набор факторов, значения весовых коэффициентов одних и тех же факторов и, соответственно, значения интегральных показателей оползневой опасности могут существенно различаться. Например, факторы, обуславливающие развитие оползневой опасности, существенно различаются для платформенной и горно-складчатой областей.

Для сравнения интегральных показателей ( $I$ ), рассчитанных отдельно для каждого инженерно-геологического таксона, рассчитывается нормированный интегральный показатель оползневой опасности по следующей формуле:

$$I_n = \frac{S_i}{I_i}, \quad (5)$$

где  $S_i$  – суммарная площадь проявлений оползневой опасности в пределах  $i$ -го класса интегрального показателя;  $I_i$  – площадь  $i$ -го класса интегрального показателя. Оптимальное количество классов, на которое разбивается нормированный интегральный показатель оползневой опасности ( $I_n$ ), установлено эмпирически и составляет от 10 до 20 классов.

Затем полученные значения нормированного интегрального показателя оползневой опасности ( $I_n$ ) разбиваются на классы. Число выделенных классов на карте оползневой опасности устанавливается априорно равным 4 или 5. Для этого весь диапазон значений нормированного интегрального показателя оползневой опасности ( $I_n$ ) разбивается на четыре-пять классов, которым присваивается качественная характеристика степени оползневой опасности. Для каждой выделенной качественной характеристики опасности указывается интервал значений нормированного интегрального показателя оползневой опасности ( $I_n$ ) в долях единицы или в процентах.

Временной оперативный прогноз базируется на выделении пороговых значений метеорологических факторов, обуславливающих аномальные активизации оползневой опасности, с последующим сравнением пороговых и фактических значений метеорологических факторов. Пороговые значения определяются эмпирическим методом без выявления механизма влияния метеорологических факторов на активизацию оползневой опасности.

Источниками метеорологических данных для составления оперативных региональных прогнозов активности оползневой опасности могут служить данные метеорологических станций и постов, а также данные радарной космической съемки. Прогнозы, составленные по данным метеорологических станций и постов, применимы к небольшой области в районе метеостанции или поста. Кроме того, большинство данных метеорологических станций и постов распространяются с частотой 1 раз в сутки. Более перспективными для составления оперативных региональных прогнозов являются данные радарной космической съемки, которые охватывают всю изучаемую территорию и распространяются с частотой 1 раз в час. Однако на метеостанциях и постах имеются более длинные ряды наблюдений, чем в архивах радарной космической съемки.

Обработка метеорологической информации (данных метеорологических станций и метеорологических постов, данных радарной космической съемки) и составление прогнозных карт активности оползневой опасности выполняется в следующем порядке:

1. Составление каталога случаев активизаций оползневой опасности (за весь период наблюдений) для изучаемой территории с характеристикой оползней, в том числе природно-техногенных факторов их активизации.
2. Климатическое зонирование изучаемой территории.
3. Выделение пороговых значений метеорологических факторов, обуславливающих аномальные активизации оползневой опасности в пределах изучаемой климатической зоны.
4. Выявление процессоопасных сезонов оползневой опасности для изучаемой территории.
5. Составление временного оперативного прогноза активизации оползневой опасности.
6. Составление дежурных карт оперативного регионального прогноза активности оползневой опасности.

Каталог случаев активизаций оползневой опасности составляется с использованием различных источников информации: данных инженерно-геологических съемок и обследований, данных государственного мониторинга состояния недр по подсистеме «опасные экзогенные геологические процессы», данных объектного мониторинга и др.

В каталог вносится следующая информация: координаты случая активизации; периоды активизации (начало и окончание); характеристика факторов активизации, в том числе метеорологических; негативные воздействия оползневой опасности.

Климатическое зонирование изучаемой территории выполняется по многолетним статистическим данным наблюдений на метеостанциях СССР и Российской Федерации. Климатическое зонирование изучаемой территории выполняется по классификации Köppen W. [5]. В результате составляется карта распространения климатических зон по классификации Köppen W. в пределах изучаемой территории.

Для выявления пороговых значений метеорологических факторов изучается интенсивность жидких атмосферных осадков (мм/час), предшествовавших активизациям оползневому процессу. Во многих зарубежных публикациях, помимо интенсивности жидких атмосферных осадков (мм/час), изучается их продолжительность (часы) в периоды, предшествовавшие активизациям оползневому процессу. Отмечается, что активизацию оползневому процессу вызывают либо жидкие атмосферные осадки высокой интенсивности, выпавшие за короткий промежуток времени (1-30 часов), либо жидкие атмосферные осадки более низкой интенсивности, выпавшие за более длительный промежуток времени (более 30 часов). Для составления временного прогноза определяется показатель интенсивности жидких атмосферных осадков за определенный промежуток времени, который вычисляется по формуле:

$$I_{\phi} = \frac{S}{D}, \quad (6)$$

где  $D$  – продолжительность жидких атмосферных осадков, часы;  $I_{\phi}$  – фактическая средняя интенсивность жидких атмосферных осадков за период  $D$ , мм/час;  $S$  – сумма жидких атмосферных осадков за период  $D$ , мм.

Пороговые значения «интенсивность-продолжительность» ( $ID$ ) чаще всего встречаются в литературе. В работе Fausto Guzzetti и др. [4] приводятся 52 формулы вычисления пороговых значений метеорологических факторов для различных территорий, большинство из которых имеют общий вид уравнения степенной функции:

$$I_{\Pi} = \alpha D^{\beta}, \quad (7)$$

где  $I_{\Pi}$  – пороговая средняя интенсивность жидких атмосферных осадков, мм/час;  $D$  – продолжительность жидких атмосферных осадков, часы;  $\alpha$  и  $\beta$  – расчетные параметры для различных климатических зон.

Для определения параметров  $\alpha$  и  $\beta$  для различных климатических зон составляется каталог случаев активизаций оползневому процессу, вызванных интенсивными или продолжительными атмосферными осадками. Затем графоаналитическим методом или методами математической статистики определяются параметры  $\alpha$  и  $\beta$ .

На этапе выявления процессоопасных сезонов оползневому процессу для изучаемой территории выполняется анализ многолетних рядов данных осадков, температуры воздуха, заключающийся в выделении временных интервалов превышения фактической средней интенсивности жидких атмосферных осадков над пороговой, что соответствует активизации оползневому процессу в прошлом.

Определение временных интервалов превышения фактической средней интенсивности жидких атмосферных осадков над пороговой выполняется отдельно для различных климатических зон, выделенных в пределах изучаемой территории. Для расчетов используются архивные суточные данные температуры воздуха и количества осадков, полученные по результатам наблюдений на метеорологических станциях и постах.

Для каждого случая активизации процесса определяются даты начала и окончания активизации, периоды, предшествующие активизации, максимальное превышение, дата максимального превышения, а также анализируется температура воздуха для каждого случая активизации. Случаи, попавшие в период отрицательных температур воздуха, когда осадки выпадают в виде снега, удаляются из расчета.

Далее рассчитываются среднемноголетние показатели активности, отдельно для различных климатических зон, выделенных в пределах изучаемой территории. Среднемноголетние показатели активности рассчитываются для каждого месяца (года) по следующей формуле:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}, \quad (8)$$

где  $A$  – показатель активности;  $P_i$  – количество активизаций в определенный месяц или год;  $n$  – продолжительность периода, для которого определяется показатель активности.

Составление временного оперативного прогноза активизации оползневому процессу заключается в определении периодов и местоположения активизации процесса. Так как по данным радарной космической съемки возможно получить значения температуры воздуха и интенсивности атмосферных осадков для всей изучаемой территории, то составление временного оперативного прогноза заключается в определении периодов активизаций процесса.

Активизацией оползневому процессу считается превышение фактической средней интенсивности жидких атмосферных осадков ( $I_{\phi}$ ) над пороговой средней интенсивностью ( $I_{\Pi}$ ).

При составлении временного оперативного прогноза активизации оползневому процессу изучаются значения жидких атмосферных осадков и

температуры воздуха за предшествующий период и выделяются временные интервалы превышения фактической средней интенсивности жидких атмосферных осадков ( $I_{\phi}$ ) над пороговой ( $I_{\pi}$ ).

Определение фактической средней интенсивности жидких атмосферных осадков ( $I_{\phi}$ ) за предшествующий период (для каждого часа) осуществляется  $N$  раз для временных интервалов длиной от 1 до  $N$  часов, где  $N$  – временной интервал, в пределах которого уравнение (7) показывает высокие прогностические качества для определенной климатической зоны. Далее  $N$  полученных значений фактической средней интенсивности жидких атмосферных осадков ( $I_{\phi}$ ) сравниваются с пороговой средней интенсивностью ( $I_{\pi}$ ). Разница ( $\Delta I$ ) вычисляется по формуле:

$$\Delta I = \frac{I_{\phi} - I_{\pi}}{I_{\pi}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где  $\Delta I$  – превышение фактической средней интенсивности жидких атмосферных осадков над пороговой, %;  $I_{\phi}$  – фактическая средняя интенсивность жидких атмосферных осадков, мм/час;  $I_{\pi}$  – пороговая средняя интенсивность жидких атмосферных осадков, мм/час.

Затем из  $N$  значений  $\Delta I$  выбираются максимальные, которые присваиваются каждому моменту времени в прошлом (кратному 1 часу). Положительное значение  $\Delta I$  соответствует прогнозной активизации оползневой процесса, за исключением периодов отрицательных температур воздуха, когда осадки выпадают в виде снега, эти периоды исключаются из расчета. Положительное значение  $\Delta I$ , превышающее 100%, соответствует катастрофической активизации оползневой процесса.

Далее составляются карты временного оперативного прогноза активизации оползневой процесса для определенного момента времени (с частотой 1 раз в час). На картах показываются участки превышения фактической средней интенсивности жидких атмосферных осадков ( $I_{\phi}$ ) над пороговой средней интенсивностью ( $I_{\pi}$ ), что соответствует активизации оползневой процесса.

Дежурные карты оперативного регионального прогноза активности оползневой процесса составляются путем совмещения пространственной и временной составляющих прогнозирования. В качестве пространственной основы прогнозирования используется карта оползневой опасности, которая считается условно постоянной, т.е. границы которой практически неизменны в течение прогнозируемого периода. В качестве временной составляющей прогнозирования используется карта превышения фактической средней интенсивности жидких атмосферных осадков ( $I_{\phi}$ ) над пороговой ( $I_{\pi}$ ), которая

составляется для определенного момента времени с интервалом в 1 час. Затем карты совмещаются и выделяются прогнозные степени активности оползневой процесса: низкая, средняя, высокая и очень высокая.

### Результаты апробации методики оперативного регионального прогноза оползневой процесса на территории Сочинского полигона

Апробация методики оперативного регионального прогноза оползневой процесса выполнялась в пределах Сочинского полигона, который находится в Краснодарском крае и включает селитебную зону муниципального образования города-курорта Сочи, спортивные объекты прибрежного и горного кластеров, совмещенную (автомобильную и железную) дорогу Адлер – Красная поляна. Площадь Сочинского полигона составляет 1 230 км<sup>2</sup>.

Территория Сочинского полигона характеризуется весьма сложными инженерно-геологическими условиями. Ситуация усугубляется повсеместным техногенным воздействием на геологическую среду. В геоморфологическом отношении территория Сочинского полигона разделяется на две части – горную и прибрежную полого-холмистую. Водная система образована реками южного склона Большого Кавказа, впадающими в Черное море. В тектоническом отношении территория полигона расположена в области северо-западного погружения кристаллического ядра Большого Кавказа и включает часть его южного склона. По данным общего сейсмического районирования (ОСР-97) Сочинский полигон расположен в зонах с высокой сейсмичностью (от 8 до 10 баллов). Территория Сочинского полигона характеризуется выпадением значительного для горных районов Большого Кавказа количеством осадков с высокой интенсивностью, как в жидком, так и в твердом виде (1 500–3 200 мм/год). Это вызвано закрытостью территории с севера хребтами Большого Кавказа, которые препятствуют поступлению холодных воздушных масс с севера, а также близостью теплого, незамерзающего водоема – Черного моря. Режим температуры воздуха связан с высотной поясностью территории Сочинского полигона и характеризуется в основном положительными среднегодовыми значениями (2,2–14,1 °С).

Оползни имеют значительное распространение на территории Сочинского полигона. Их развитию способствуют: сильно расчлененный горный рельеф, разнообразный состав четвертичных и дочетвертичных горных пород, большое количество атмосферных осадков. Также влияет сеть тектонических нарушений и повышенная сейсмичность. В последние годы значительную роль играет

техногенный фактор, связанный с подрезкой склонов при проведении строительных работ, вырубкой деревьев, динамическим воздействием при движении большегрузного транспорта по автодорогам, складированием техногенных грунтов на склонах и откосах автодорог, нарушением поверхностного и подземного стока, утечками из водопроводящих коммуникаций и др. Совокупность вышеперечисленных факторов определила большое генетическое разнообразие оползней. Чаще всего формируются комбинированные оползневые формы (блоковое смещение горных пород, переходящее в оползни-потоки, обусловленные вязкопластическим течением). Возраст оползневых отложений – от среднечетвертичных до современных. Средняя пораженность территории Сочинского полигона оползневой процессом составляет 7-8%, а на отдельных участках достигает 70-80%. Активность оползней меняется и существенно зависит от метеорологических факторов. В среднем ежегодно активизируется 35% от общего числа оползней. В годы массовых активизаций доля активных оползней увеличивалась до 65-70%. В 2011 г. на территории Сочинского полигона наблюдалось резкое увеличение активности оползневой процессу, связанное с масштабным техногенным воздействием на геологическую среду.

Для территории Сочинского полигона и прилегающей горной части южного склона Большого Кавказа составлена карта оползневой опасности масштаба 1:200 000. Алгоритм оценки оползневой опасности на территории Сочинского полигона представлен на рис. 1.

На начальном этапе оценки оползневой опасности составлена карта проявлений оползневой процессу в пределах Сочинского полигона и прилегающей горной части южного склона Большого Кавказа. Для составления карты проявлений оползневой процессу использовались фондовые материалы, данные государственного мониторинга состояния недр по подсистеме «опасные экзогенные геологические процессы», а также результаты дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли. Из общего количества проявлений выбраны активные или периодически активизирующиеся оползни. Крупные сейсмогравитационные оползни, находящиеся в стабильном состоянии, исключались из рассмотрения.

На стадии инженерно-геологического районирования, по геоморфологическому признаку, выделено 2 типа рельефа, которые рассматривались как системы с присущими им типичными особенностями развития оползневой процессу. Анализ связи распространения оползней и различных факторов производится отдельно для каждого типа рельефа.

С учетом опыта проведенных ранее исследований и имеющихся фактических данных, определялся набор факторов, обуславливающих развитие оползневой процессу (табл. 1). Для каждого фактора построена карта распространения классов фактора, а для факторов, имеющих непрерывные значения, по гистограммам распределения выделены интервалы классов.

В качестве оценки влияния отдельных факторов на развитие оползневой процессу использовался коэффициент Крамера, который изменяется в диапазоне от 0 до 1 и рассчитывается по формуле (1).

Факторы, имеющие низкие значения коэффициента Крамера (или весового коэффициента) и, соответственно, незначительно влияющие на развитие оползневой процессу, исключались из анализа. В качестве порогового значения весового коэффициента для исключения факторов из анализа принято значение 0,3.

Установлено, что из выбранного набора факторов для 1-го типа рельефа наибольшее влияние на развитие оползневой процессу оказывают следующие: литологический состав четвертичных образований, густота водотоков и тип землепользования (табл. 1). В меньшей степени влияют следующие факторы: кривизна склонов, рассеянная солнечная радиация за год и относительное положение склонов. Фактор прямой солнечной радиации был исключен из анализа, так как имеет значение весового коэффициента ниже порогового. Также из анализа для 1-го типа рельефа был исключен фактор густоты разрывных нарушений, так как наибольшее количество проявлений оползневой процессу расположено на участках, где разрывные нарушения отсутствуют, что говорит об отсутствии влияния густоты разрывных нарушений на развитие оползневой процессу в пределах 1-го типа рельефа.

Из выбранного набора факторов для 2-го типа рельефа наибольшее влияние на развитие оползневой процессу оказывают следующие: литологический состав дочетвертичных образований и кривизна склонов (табл. 1). В меньшей степени влияют следующие факторы: густота водотоков и относительное положение склонов. Фактор прямой солнечной радиации был исключен из анализа, так как имеет значение весового коэффициента ниже порогового.

На этапе составления карты оползневой опасности по формуле (4) рассчитывалась вероятность возникновения оползней для каждого класса каждого фактора в пределах 1-го и 2-го типов рельефа. Затем весовые коэффициенты уточненного набора факторов для 1-го и 2-го типов рельефа нормировались таким образом, чтобы сумма весов всех факторов равнялась 1. Далее для 1-го и 2-го типов рельефа по формуле (3)

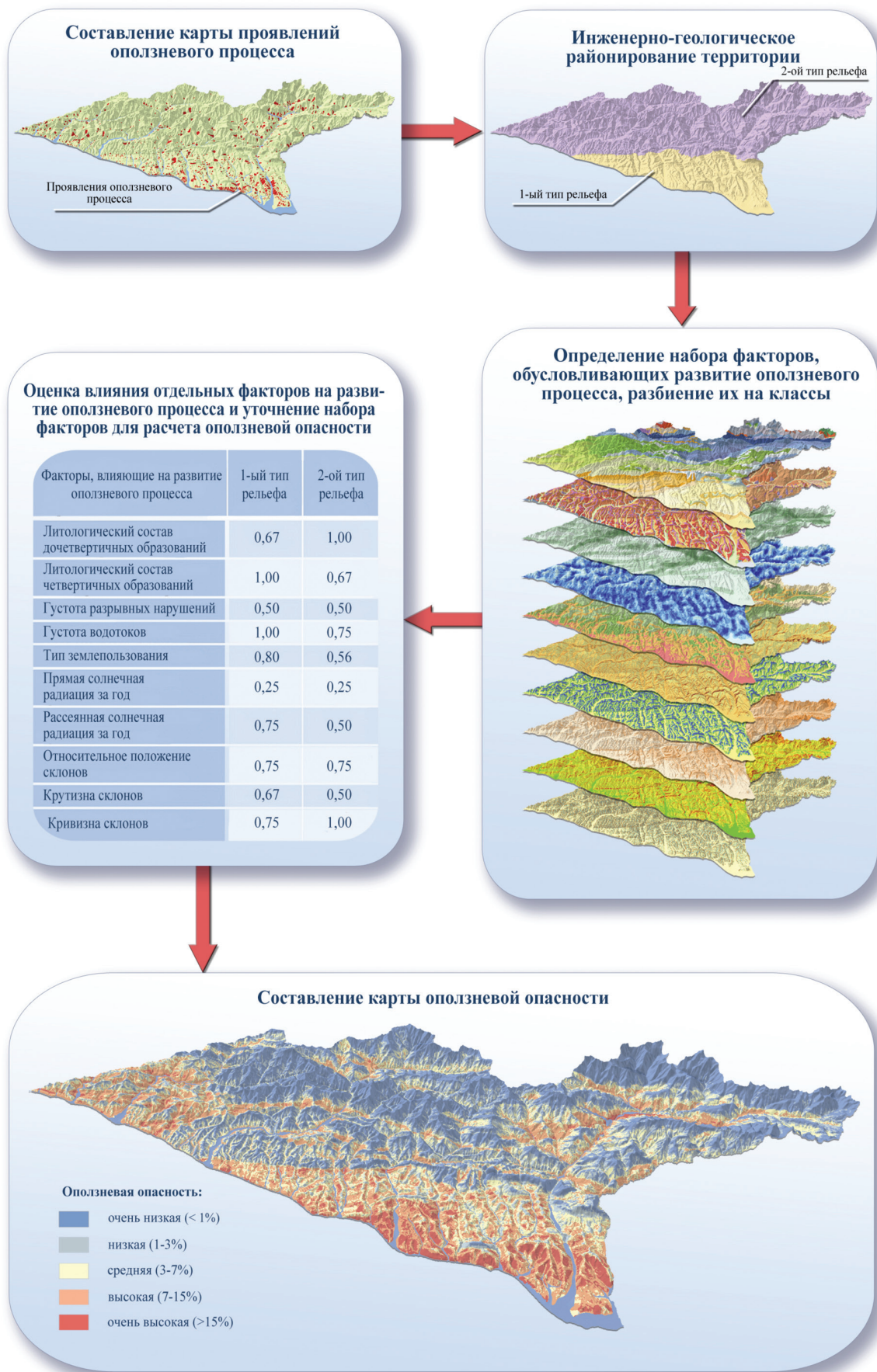


Рис. 1. Алгоритм оценки оползневой опасности на территории Сочинского полигона

Fig. 1. The algorithm of landslide hazard zonation in Sochi polygon

Таблица 1

**Весовые коэффициенты факторов, влияющих на развитие оползневой процесса***The weight coefficients of the defining factors of landslide process*

Факторы, влияющие на развитие оползневой процесса	Значения весовых коэффициентов	
	1-й тип рельефа	2-й тип рельефа
Литологический состав дочетвертичных образований	0,67	1,00
Литологический состав четвертичных образований	1,00	0,67
Густота разрывных нарушений	0,50	0,50
Густота водотоков	1,00	0,75
Тип землепользования	0,80	0,56
Прямая солнечная радиация за год	0,25	0,25
Рассеянная солнечная радиация за год	0,75	0,50
Относительное положение склонов	0,75	0,75
Кругизна склонов	0,67	0,50
Кривизна склонов	0,75	1,00

рассчитывался интегральный показатель оползневой опасности. Используя гистограммы распределения, для 1-го и 2-го типов рельефа диапазон значений интегрального показателя был разбит на 20 классов. Затем для 1-го и 2-го типов рельефа по формуле (5) рассчитывался нормированный интегральный показатель оползневой опасности. Диапазон значений нормированного интегрального показателя оползневой опасности был разбит на 5 интервалов, каждому из которых была присвоена качественная характеристика степени оползневой опасности: очень низкая, низкая, средняя, высокая и очень высокая. Очень низкая оползневая опасность соответствует пораженности территории проявлениями оползневой опасности <1%, низкая – 1-3%, средняя – 3-7%, высокая – 7-15%, очень высокая – >15%. Карта оползневой опасности территории Сочинского полигона масштаба 1:200 000 представлена на рис. 2.

Для выявления пороговых значений метеорологических факторов составлен каталог случаев активизации оползневой процесса в пределах Сочинского полигона и прилегающей горной части южного склона Большого Кавказа. Каталог включает 30 случаев активизаций оползневой процесса. Для включения в каталог применялись следующие критерии: наличие информации о точной дате активизации оползневой процесса; основной причиной активизации оползневой процесса являлся метеорологический фактор, а именно, выпадение жидких атмосферных осадков в периоды, предшествовавшие активизациям; наличие информации об административной или координатной привязке активизировавшегося проявления оползневой процесса.

Согласно климатической классификации Кӧрпен W. [5], территорию Сочинского полигона возможно разделить на 2 климатические зоны – С и D. Отличительная особенность климатической зоны С – средняя температура самого холодного месяца варьирует от –3 до 18 °С. Отличительная особенность климатической зоны D – средняя температура самого теплого месяца превышает 10 °С, средняя температура самого холодного месяца ниже –3 °С. Для составления карты распространения климатических зон С и D проанализирована зависимость средней температуры самого холодного месяца, самого теплого месяца и абсолютных отметок по 5 метеостанциям, расположенным в пределах Сочинского полигона. Значению температуры воздуха самого холодного месяца, равной –3 °С, соответствует абсолютная отметка рельефа 1 182 м, что соответствует границе зон С и D по классификации Кӧрпен W. и приблизительно соответствует границе зоны неустойчивого снежного покрова и зоны переменного снежного покрова. Температура самого теплого месяца превышает 10 °С, что соответствует условиям выделения климатической зоны D. Карта распространения климатических зон С и D, по классификации Кӧрпен W., в пределах Сочинского полигона представлена на рис. 3.

На стадии выделения пороговых значений метеорологических факторов, обуславливающих аномальные активизации оползневой процесса, проанализированы зарубежные публикации для территорий со сходными климатическими условиями. Для экстраполяции пороговых значений «интенсивность-продолжительность» (ID) на территорию



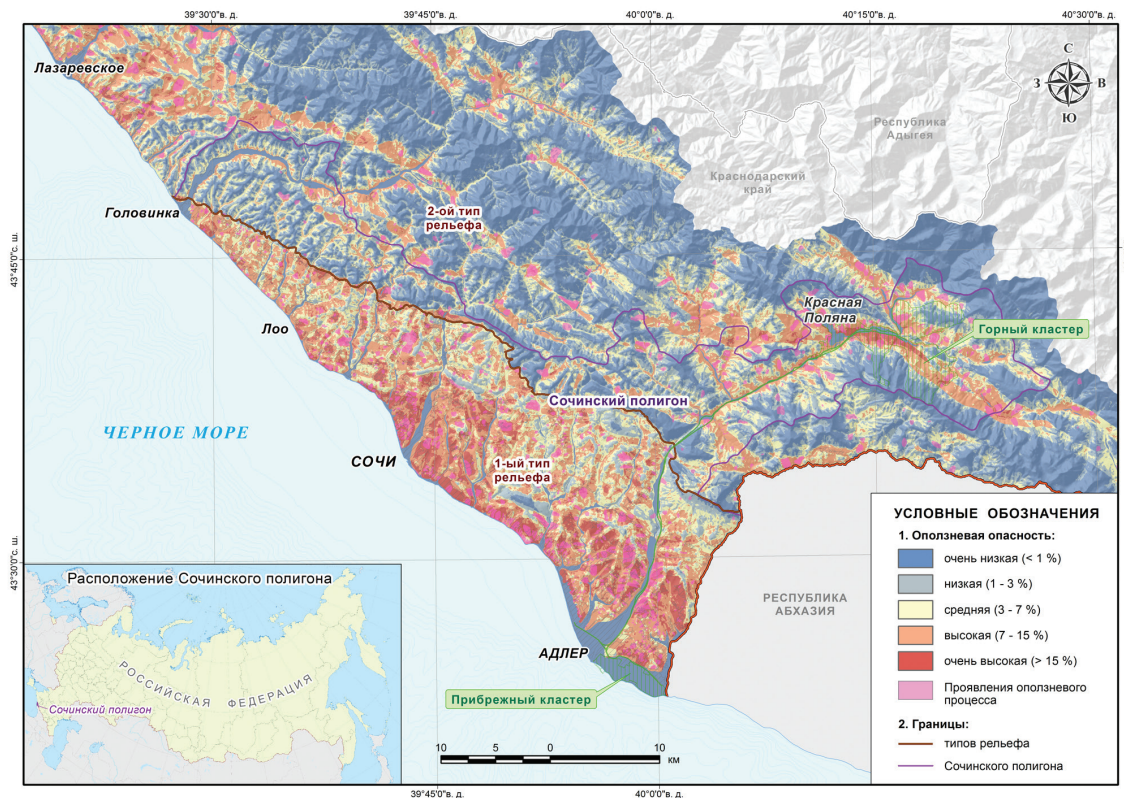


Рис. 2. Карта оползневой опасности территории Сочинского полигона масштаба 1:200 000

Fig. 2. The landslide hazard map of Sochi polygon scale 1: 200 000

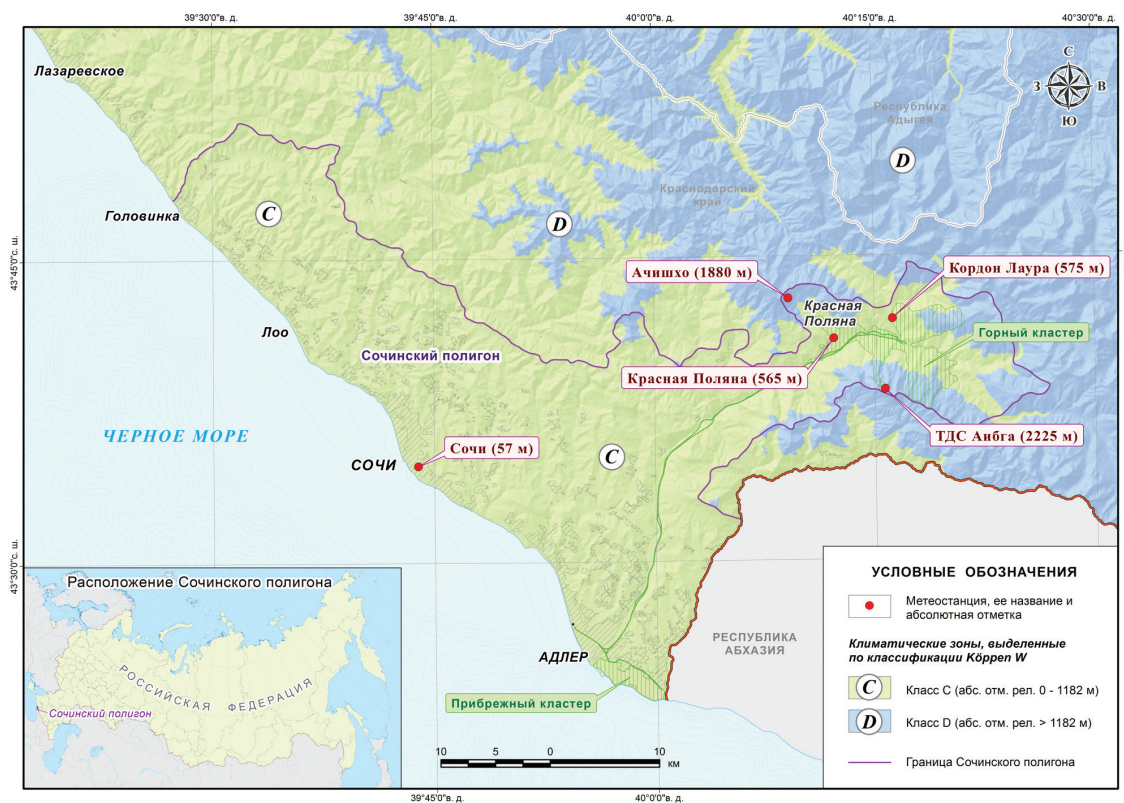


Рис. 3. Карта распространения климатических зон C и D по классификации Көppen W. в пределах Сочинского полигона.

Fig. 3. The climatic zones C and D map of Sochi polygon according to the classification of Köppen W.

Сочинского полигона выбраны следующие пороговые формулы (из работы Fausto Guzzetti [4]), определенные для Центральной и Юго-восточной Европы:

$$I_{II} = 15,56D^{-0,70} \quad (\text{зона C}), \quad (10)$$

$$I_{II} = 7,56D^{-0,48} \quad (\text{зона D}). \quad (11)$$

Пороговые формулы применимы для климатических зон C и D, по классификации Köppen W. [5]. Для проверки прогностических качеств экстраполированных пороговых формул (10) и (11) производилось сравнение с каталогом случаев активизаций оползневой процесса, вызванных выпадением жидких атмосферных осадков. Каталог содержит случаи активизаций, фиксировавшихся только в пределах климатической зоны C. Для климатической зоны D данные об активизациях отсутствуют, поэтому пороговая формула (11) экстраполировалась без проверки. Для климатической зоны C пороговая формула (10) и случаи активизаций из каталога нанесены на график в логарифмическом масштабе, в котором степенная функция приобретает вид прямой (рис. 4).

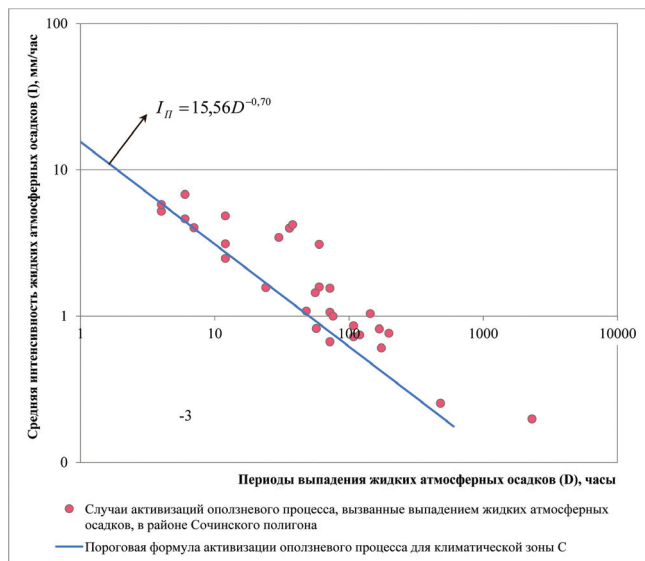


Рис. 4. Проверка пороговой формулы для климатической зоны C

Fig. 4. Verify of the limit formula for climate zone C

Расположение точек (случаев активизаций оползневой процесса, вызванных выпадением жидких атмосферных осадков) около линии пороговой формулы и выше нее подтверждает прогностическую способность пороговой формулы (10) для климатической зоны C, расположенной в пределах Сочинского полигона.

Выявление процессоопасных сезонов оползневой процесса для территории Сочинского полигона заключалось в анализе многолетних рядов данных осадков, температуры воздуха, с выделением временных интервалов превышения фактической средней

интенсивности жидких атмосферных осадков над пороговой, что соответствует активизации оползневой процесса в прошлом. Расчет среднееголетних показателей активности оползневой процесса производился для климатических зон C и D по 5 метеостанциям. В целом для климатической зоны C процессоопасным периодом для оползневой процесса является сентябрь–январь. Для климатической зоны D процессоопасным периодом для оползневой процесса является июнь, август.

В связи с высокой частотой поступления спутниковых метеоданных (с интервалом в 1 час) была разработана автоматизированная система сбора и обработки информации. Алгоритм работы автоматизированной системы сбора и обработки информации для оперативного прогноза активности оползневой процесса (Landslide activity prediction system – LAPS) представлен на рис. 5.

Метеорологическая информация поступает на сервер Центра ГМСН, обрабатывается в модуле загрузки и заносится в базу данных LAPS. Затем из базы данных метеорологическая информация поступает в модуль обработки, в котором по методике оперативного регионального прогноза оползневой процесса создаются прогнозные карты активности. Далее полученные прогнозные карты поступают на WEB Server Центра ГМСН, на котором организовывается доступ заинтересованных пользователей к прогнозной информации. Дежурные карты оперативного регионального прогноза активности оползневой процесса составляются путем совмещения пространственной и временной составляющих прогнозирования. Пример дежурной прогнозной карты представлен на рис. 6.

Карта оползневой опасности может быть использована для обоснования размещения пунктов наблюдательной сети мониторинга оползневой процесса, для планирования хозяйственного освоения новых территорий, решения задач гражданского и других видов строительства, уточнения комплексных схем инженерной защиты территории Сочинского полигона.

Дежурные карты оперативного регионального прогноза позволяют определять район и время возможной катастрофической активизации оползневой процесса, что может предотвратить человеческие жертвы, путем своевременной эвакуации из различных зданий или приостановкой автомобильного и железнодорожного автотранспорта перед участками активизации процесса.

Методика оперативного регионального прогноза применима и к другим генетическим типам экзогенных геологических процессов, активизация которых обусловлена выпадением жидких атмосферных осадков в периоды, предшествовавшие

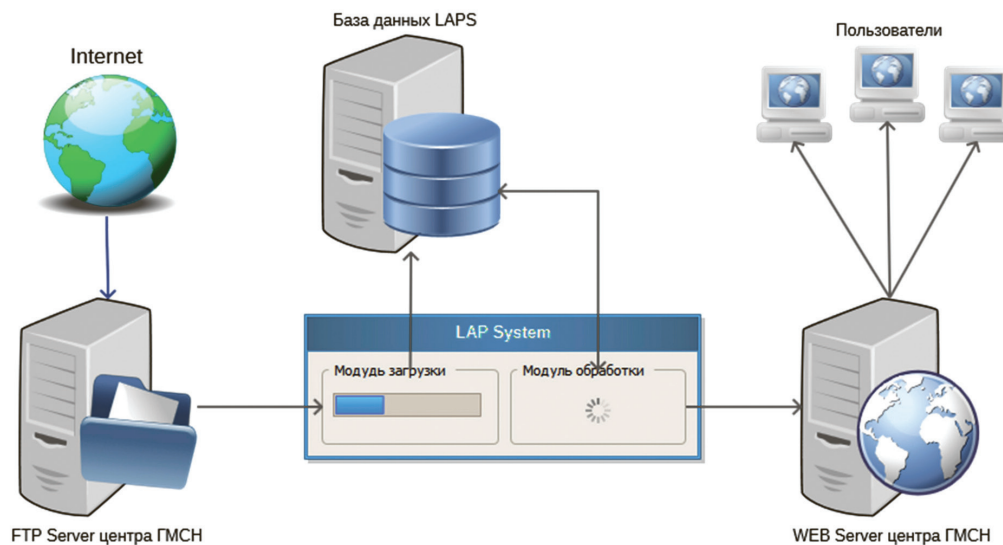


Рис. 5. Алгоритм работы автоматизированной системы сбора и обработки информации для оперативного прогноза активности оползневой процесса (Landslide activity prediction system – LAPS)

Fig. 5. The algorithm of the automated system of gathering and processing information for operative prediction activity of landslide process (Landslide activity prediction system – LAPS)

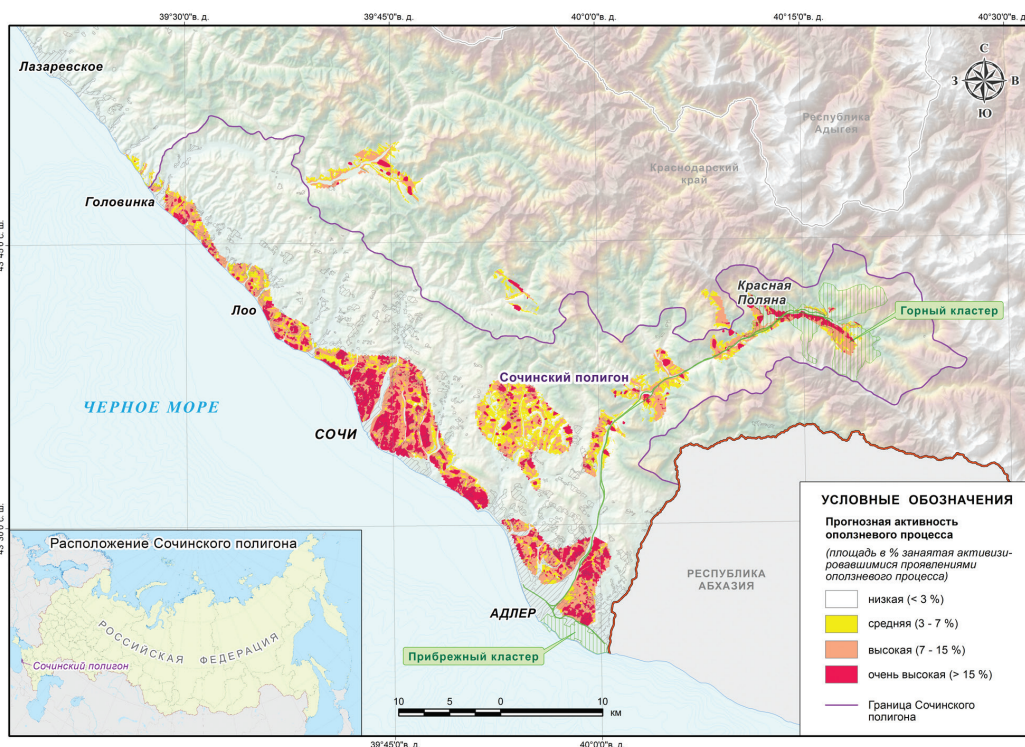


Рис. 6. Пример дежурной карты оперативного регионального прогноза активности оползневой процесса

Fig. 6. An example of a map of operative regional prediction activity of landslide process

активизациям. Кроме того, при наличии фондовых метеоданных возможно определить показатели активности оползневой и других процессов для определенного периода в прошлом.

Временная составляющая оперативного регионального прогноза учитывает влияние на активизацию оползневой процесса только жидких

атмосферных осадков. В дальнейшем перспективно разрабатывать методики оперативного прогноза оползневой и других экзогенных геологических процессов, временная составляющая которых учитывает влияние других триггерных факторов, таких, как эрозионная деятельность постоянных и временных водотоков, сейсмические события,

антропогенное воздействие, увлажнение горных пород при снеготаянии и др.

### Заключение

В результате выполненных работ разработана методика сбора, обработки информации и оперативного регионального прогноза оползневой опасности, а также выполнена ее апробация на примере Сочинского полигона.

Оползни имеют значительное распространение на территории Сочинского полигона. В 2011 г. на территории Сочинского полигона наблюдалось резкое увеличение активности оползневой опасности, связанное с масштабным техногенным воздействием на геологическую среду. Тем не менее активность оползневой опасности зависит в основном от метеорологических факторов.

Для территории Сочинского полигона составлена карта оползневой опасности масштаба 1:200 000.

В низкогорной части Сочинского полигона территории с очень высокой, высокой и средней оползневой опасностью приурочены к выходам неогеновых и палеогеновых отложений и перекрывающих их коллювиально-делювиальных и делювиальных отложений. Территории с очень низкой и низкой оползневой опасностью приурочены к выходам верхнемеловых дочетвертичных отложений. Также территории с очень низкой и низкой оползневой опасностью расположены в пределах распространения аллювиальных и элювиальных отложений. Кроме того, степень оползневой опасности определяется морфометрическими и техногенными факторами. В низкогорной части Сочинского полигона наиболее опасными с точки зрения оползневой опасности являются территории Адлерского, Лазаревского и Центрального районов муниципального образования города-курорта Сочи.

В пределах низко-, средне- и высокогорного рельефа Большого Кавказа территории с очень высокой, высокой и средней оползневой опасностью приурочены к выходам нижнеюрских и нижнемеловых отложений. На остальной территории оползневая опасность оценивается как очень низкая и низкая. Кроме того, степень оползневой опасности определяется морфометрическими и техногенными факторами. В средне- и высокогорной части Сочинского полигона наиболее опасными с точки зрения оползневой опасности являются территории Краснополянского поселкового округа, расположенного в Адлерском районе муниципального образования города-курорта Сочи. В Краснополянском поселковом округе расположены спортивные объекты горно-кластера, большая часть которых расположена на

территориях с очень высокой и высокой оползневой опасностью.

В пределах Сочинского полигона выявлены пороговые суммы и интенсивность атмосферных осадков накануне аномальных активизаций оползневой опасности, а также доказана применимость пороговых значений «интенсивность-продолжительность» для оперативного регионального прогноза оползневой опасности на территории Сочинского полигона.

В связи с высокой частотой поступления спутниковых метеоданных, разработана автоматизированная система сбора и обработки информации (LAPS), которая позволяет составлять дежурные карты оперативного регионального прогноза активности оползневой опасности с частотой 1 раз в час.

**Ключевые слова:** Сочинский полигон, оползневой процесс, прогноз, метеорологические факторы активизации, оползневая опасность.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гулакян К.А., Кунтцель В.В., Постоев Г.П. Прогнозирование оползневых процессов. – М. : Недра, 1977. – 135 с.
2. Осипов В.И., Кутепов В.М., Зверев В.Л. и др. Опасные экзогенные процессы. – М. : ГЕОС, 1999. – 290 с.
3. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. – Тольятти : ИЭВБ РАН, 2003. – 463 с.
4. Guzzetti F., Peruccacci S., Rossi M., Stark C.P. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in Central and Southern Europe // *Meteorology and Atmospheric Physics*. – 2007. – No. 98 (3). – P. 239-267.
5. Köppen W. Das geographische System der Klimate (The geographic system of climates) // *Handbuch der Klimatologie : in fünf Bänden*. – Bd. 1, Teil C / Edited by Köppen W., Geiger R. – Berlin, 1936. – P. 110-152.

### REFERENCES

1. Gulakyan K.A., Kuntsel V.V., Postoev G.P. Prediction of landslide processes. M. : Nedra, 1977. 135 p.
2. Osipov V.I., Kutepov V.M., Zverev V.L. and other. Hazard exogenous processes. M. : GEOS, 1999. 290 p.
3. Shitikov V.K., Rosenberg G.S., Zinchenko T.D. Quantitative hydroecology: system identification methods. Tolyatti : IEVB RAS, 2003. 463 p.
4. Guzzetti F., Peruccacci S., Rossi M., Stark C.P. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in Central and Southern Europe // *Meteorology and Atmospheric Physics*. 2007. No. 98 (3). P. 239-267.
5. Köppen W. The geographic system of climates // *Handbook of climatology : in five volumes*. Bd. 1, Part C / Edited by Köppen W., Geiger R. Berlin, 1936. P. 110-152.