

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ОПОЛЗНЕВОГО РИСКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОКАЗАТЕЛЯ ХЁРСТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

А. И. Кацко, магистрант

С. И. Маций, доктор технических наук

*Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина,
г. Краснодар, Россия*

Аннотация

Работа нацелена на разработку эффективной мелиорационной методики оценки состояния оползня по результатам наблюдений, полученных в реальном режиме времени с использованием автоматизированной системы мониторинга, включающей геотехническое и геодезическое оборудование. Объект исследования – реальные данные результатов геотехнического мониторинга горного ландшафта. Представлена классификация участков оползневого тела по группам риска. Результаты анализа данных мониторинга оползневого склона позволяют сделать вывод, что скорость ползучести почвы может характеризоваться показателем Хёрста. Предлагается использовать метод идеальной точки для упорядочивания инклинометрических скважин по степени риска.

Ключевые слова: охрана земель, оползень, геотехнический мониторинг, индекс Хёрста, анализ, идеальная точка.

Abstract

A. I. Katsko, S. I. Matsiy

ANALYSIS AND ASSESSMENT OF LANDSLIDE RISK WITH USE OF THE HURST INDICATOR BASED ON THE RESULTS OF GEOTECH MONITORING

The purpose of the work is to develop a methodology for assessing the state of a landslide based on the results of observations obtained in real time use an automated monitoring system including geotechnical and geodetic equipment. The object of the study is the real data of the results of geotechnical monitoring. The landslide body sites by risk groups are presented. The obtained results of the analysis of the monitoring data of the landslide slope allow us to conclude that the creep rate can be characterized by the Hurst index. To arrange inclinometric wells according to the degree of risk, it is proposed to use the ideal point method.

Keywords: land protection, landslide, geotechnical monitoring, Hurst index, analysis, ideal point.

Введение

Антропогенное воздействие на природу в сельской местности влечет за собой техногенное изменение естественного природного ландшафта и превращение его в агроландшафт. Основным ресурсом в сельском хозяйстве является земля (сельскохозяйственные угодья, в том числе пашня, пастбища, сенокосы, земли, занятые многолетними насаждениями и др.). Кроме того, рассматриваются земли населенных пунктов, особо охраняемых территорий, связанные между собой линейными объектами.

Одна из основных задач современной мелиорации – надежная и рациональная эксплуатация земель различного назначения. Для этого необходимо применять комплексный

подход к мелиорации и охране переувлажненных и подверженных деградации земель, что достигается использованием ресурсосберегающих адаптированных технологий. Инженерная защита объектов гражданского, промышленного, гидротехнического назначений, автомобильных и железных дорог предусматривает проведение инженерно-геодезических, инженерно-геологических изысканий, расчет коэффициента устойчивости склона, проектирование мероприятий противооползневой защиты и их дальнейшую эксплуатацию [1].

Защиту техногенных агроландшафтов следует проводить комплексно с выделением двух этапов [2–6]. На первом этапе охраны техногенных агроландшафтов осуществляют

мелиорацию и охрану земель от подтопления и переувлажнения. На втором этапе осуществляются мониторинг техногенных агроландшафтов, прогнозы по подтоплению, переувлажнению и развитию оползневых процессов.

Геотехнический мониторинг позволяет выявить развитие неблагоприятных тенденций. Визуальный мониторинг с использованием инструментальных измерений проводят по специальной программе работ с частотой, обусловленной интенсивностью оползневых процессов (обычно несколько раз в месяц). В сложных инженерно-геологических условиях рекомендуется применение автоматизированных систем мониторинга, с помощью которых можно проводить измерения через определенный промежуток времени (например, каждые 20 минут) в течение нескольких месяцев.

Традиционно результаты мониторинга представляются с использованием графического изображения развития оползневых процессов и носят описательный характер. Пока еще не разработана методика, позволяющая проводить аналитическое исследование результатов геотехнического мониторинга

оползневых процессов и упорядочивание различных участков оползневого склона по степени риска.

В нормативной документации, такой как СП 305.1325800.2017, СП 22.13330.2011, ГОСТ 31937-2011, ОДМ 218.3.008-2011, содержится исчерпывающе большой объем указаний о видах и методах проведения геотехнического мониторинга, составлении программы работ, однако анализ результатов мониторинга оформлен только как графическое (качественное) описание поведения наблюдаемого явления [7–10]. Для совершенствования процесса поддержки принятия конкретного решения по изучаемому объекту необходимо использовать количественные показатели, поэтому требуется разработать алгоритм анализа и оценки оползневого риска по результатам геотехнического мониторинга.

Результаты геотехнического мониторинга представляют собой временные ряды. Временной ряд – это расположенная в хронологическом порядке последовательность наблюдений за некоторым явлением, характер которого меняется со временем:

$$X_1, X_2, \dots, X_{t-1}, X_t.$$

Изучение оползневого процесса с использованием показателя Хёрста

Характеристика исходных данных. Объект исследования – строительство и реконструкция подпорных стенок на автомобильной дороге А–147 Джубга – Сочи (граница с Республикой Абхазия, Краснодарский край). Длина участка – 1675 м, диапазон – 195 км + + 310 м – 196 км + 985 м (привязка к километровым знакам).

Регистрация данных мониторинга производилась на протяжении 4 месяцев непрерывно каждые 20 минут. Результаты были оформлены в виде графиков раскрытия деформационных швов, отклонений от вертикали сооружений и инклинометрических обсадных труб; их следует рассматривать как многомерные временные ряды, которые можно изучать с использованием модели векторной авторегрессии и применять для прогнозирования изменения данных [11–16].

Измерения проводились в шести группах (точках) – I–VI. В табл. 1 показано применяемое оборудование: наклонометры, трещиномеры (точки I, VI); датчики давления, наклоно-

меры, трещиномеры (точка II); инклинометры, датчики давления, наклонометры, трещиномеры (точки III–V). При использовании данных по трещиномерам и инклинометрам рассматривался итоговый общий вектор (рис. 1). Анализ наблюдений проводился на основе статистического пакета GRETЛ.

На практике в пределах одного оползневого цирка оползень может разбиваться на несколько участков. При проведении мониторинга и разработке противооползневых мероприятий для поддержки процесса принятия решений требуется ранжировать эти участки по степени риска.

Оползневые процессы могут объясняться как внезапными климатическими проявлениями (ливни, ураганы, землетрясения и т. п.), так и долговременными процессами (внешняя нагрузка, собственный вес грунта, разложение органики, износ удерживающих конструкций), для описания которых может использоваться аппарат статистической теории векторной авторегрессии [12].

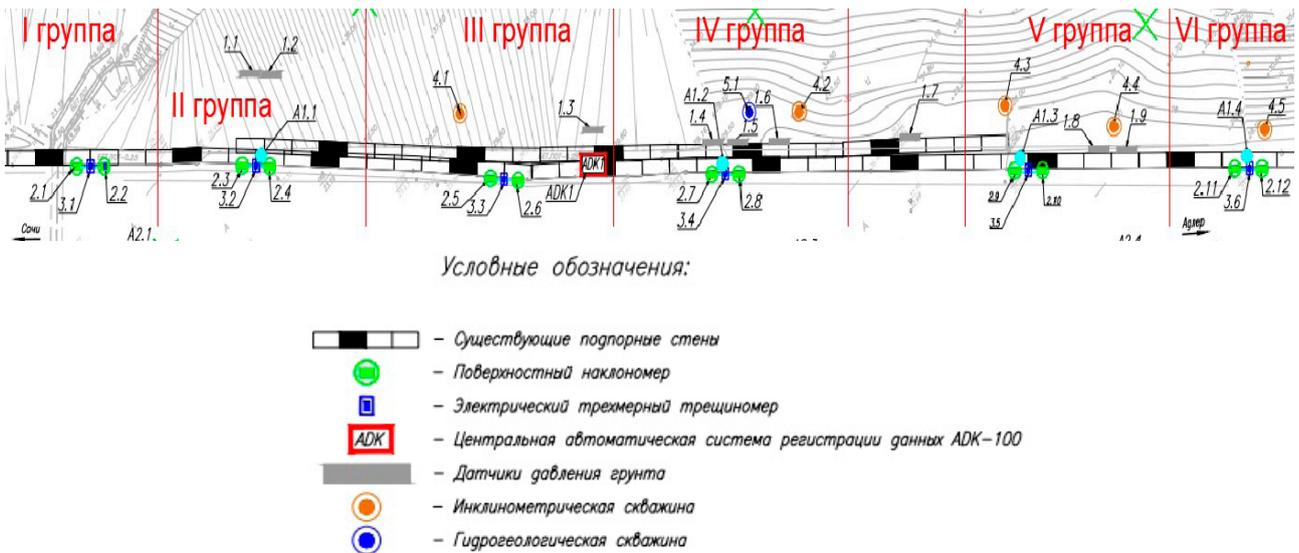


Рис. 1. Разделение объекта мониторинга на группы (точки)

Таблица 1. Спецификация общего количества применяемого геотехнического оборудования

Применяемое оборудование	Место установки	Кол-во оборудования	Наблюдаемые параметры
Датчик давления грунта	Оползневой склон	9 шт.	Давление оползневого массива на подпорное сооружение
Инклинометрическая скважина	Оползневой склон	5 скважин по 25 м на верховом сооружении	Глубинные деформации оползневого массива
Гидрологическая скважина	Оползневой склон	1 скважина, 20 м	Уровень грунтовых вод
Электрические трехмерные трещиномеры	Подпорное сооружение	6 шт. на верховом сооружении	Смещения секций конструкции подпорных сооружений
Наклономеры	Подпорное сооружение	12 шт. на верховом сооружении	Наклон подпорного сооружения
Система сбора данных ADK	Подпорное сооружение	2 шт.	Сбор, обработка и передача данных

Альтернативный подход к изучению оползневых процессов реализовал в 1951 г. английский гидролог Г. Хёрст, предложивший использовать относительную R/S-статистику [14]:

$$\frac{R}{S(n)} = \frac{1}{s_n} \left[\max \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}_n) - \min \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}_n) \right], \quad (1)$$

где $1 \leq k \leq n$, $s_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2}{n}}$ – стандартное отклонение для всего ряда;

R – размах накопленных отклонений n значений от \bar{x}_n – среднего значения ряда;

x_i – случайная величина, наблюдаемая в дискретные промежутки времени;

n – количество измерений;

k – длина выборки.

R/S-статистика всегда неотрицательна и представляет собой преобразованный вариант размаха вариации признака ($R = x_{\max} - x_{\min}$).

С опорой на минимальные положения об изучаемой системе показатель Хёрста позволяет классифицировать временные ряды и отличать случайный ряд от неслучайного.

В 1969 г. было предложено использовать R/S-анализ для обнаружения «памяти ряда», то есть долговременных трендов, циклических и т. д., генерируемых случайным процессом, в виде формулы

$$\frac{R}{S(n)} \sim n^H, \quad (2)$$

где H – известная экспонента Хёрста.

Коэффициент Хёрста предлагается оценивать в двойных логарифмических координатах ($\log(R/S(n))$ и $\log(n)$).

Известно, что экспонента Хёрста в зависимости от принимаемых значений интерпретируется так [6]:

$H = 0,5$ – случайный процесс (корреляции во временном ряде отсутствуют, $C = 0,5$ – процесс без памяти);

$0 < H < 0,5$ – демонстрирует возврат к среднему (приращения коррелированы, но имеет-ся вероятность переворота на противоположную тенденцию) или антиперсистентный ряд;

$0,5 < H < 1$ – устойчивый тренд (ряд с памятью) или персистентный, сила которого увеличивается при приближении к 1.

Значение $H = 1$ отражает присутствие отдаленной корреляции степенного вида (указывает на нестационарность ряда и может описываться как проблема единичного корня, требующая привлечения расширенного теста Дики – Фуллера).

Рассмотрим для изучаемых наблюдений показатель Хёрста (табл. 2), полученный с использованием статистического пакета GRETLL, где g_4 – датчики давления грунта на искусственное противооползневое сооружение; ab – показания инклинометра на различной глубине; $Grad$ – показания наклономера; g_1 – показания трещиномера; H_vod_stlb – показания датчика-измерителя грунтовых вод.

Таким образом, практически для всех временных рядов точки IV наблюдается сохранение долговременной тенденции, в том числе и для скорости изменения давления датчиков и высоты водяного столба. Для скорости изменения остальных переменных показатель Хёрста меньше 0,5, что указывает на затухающую ползучесть в данной точке.

Для точек V (табл. 3) и VI (табл. 4, рис. 2) поведение наблюдений, измеренных с использованием датчиков давления, наклономера, трещиномера, уровня грунтовых вод и инклинометрической скважины 2, может говорить о нестационарности изучаемых процессов, так как для отдельных периодов изменяются средние значения и амплитуды колебаний при отсутствии тренда.

Таблица 2. Показатели Хёрста для временных рядов в точке IV

Временной ряд	Показатель Хёрста для исходного ряда	Показатель Хёрста для первой разности ряда
g_{441}	0,954816	0,646850
g_{451}	0,951136	0,585589
g_{461}	0,979035	0,625741
ab_{21}	0,971927	0,179021
ab_{22}	1,031940	0,174535
ab_{23}	0,902328	0,168730
ab_{24}	1,070680	0,304184
ab_{25}	1,094620	0,239277
ab_{26}	1,026980	0,153749
$Grad_{41}$	0,976651	0,233768
$Grad_{42}$	0,988816	0,189191
$Grad_{43}$	0,988002	0,196438
$Grad_{44}$	0,812111	0,258897
g_{144}	0,956265	0,463560
H_vod_stlb	0,956421	0,731727

Таблица 3. Показатели Хёрста для временных рядов в точке V

Временной ряд	Показатель Хёрста для исходного ряда	Показатель Хёрста для первой разности ряда
<i>g_481</i>	0,956614	0,615885
<i>g_491</i>	0,947396	0,602717
<i>ab31</i>	1,03417	0,172338
<i>ab32</i>	0,773651	0,172145
<i>ab33</i>	0,930022	0,177218
<i>ab34</i>	0,972251	0,161146
<i>ab35</i>	0,908332	0,173577
<i>ab36</i>	0,955585	0,210824
<i>ab41</i>	0,80643	0,113133
<i>ab42</i>	0,852495	0,18337
<i>ab43</i>	0,979336	0,157236
<i>ab44</i>	0,873958	0,167007
<i>ab45</i>	0,805712	0,145784
<i>ab46</i>	0,846642	0,143709
<i>Grad51</i>	0,928694	0,340394
<i>Grad52</i>	0,774093	0,170888
<i>Grad53</i>	0,984986	0,228628
<i>Grad54</i>	0,850359	0,217114
<i>g_154</i>	0,803714	0,260158

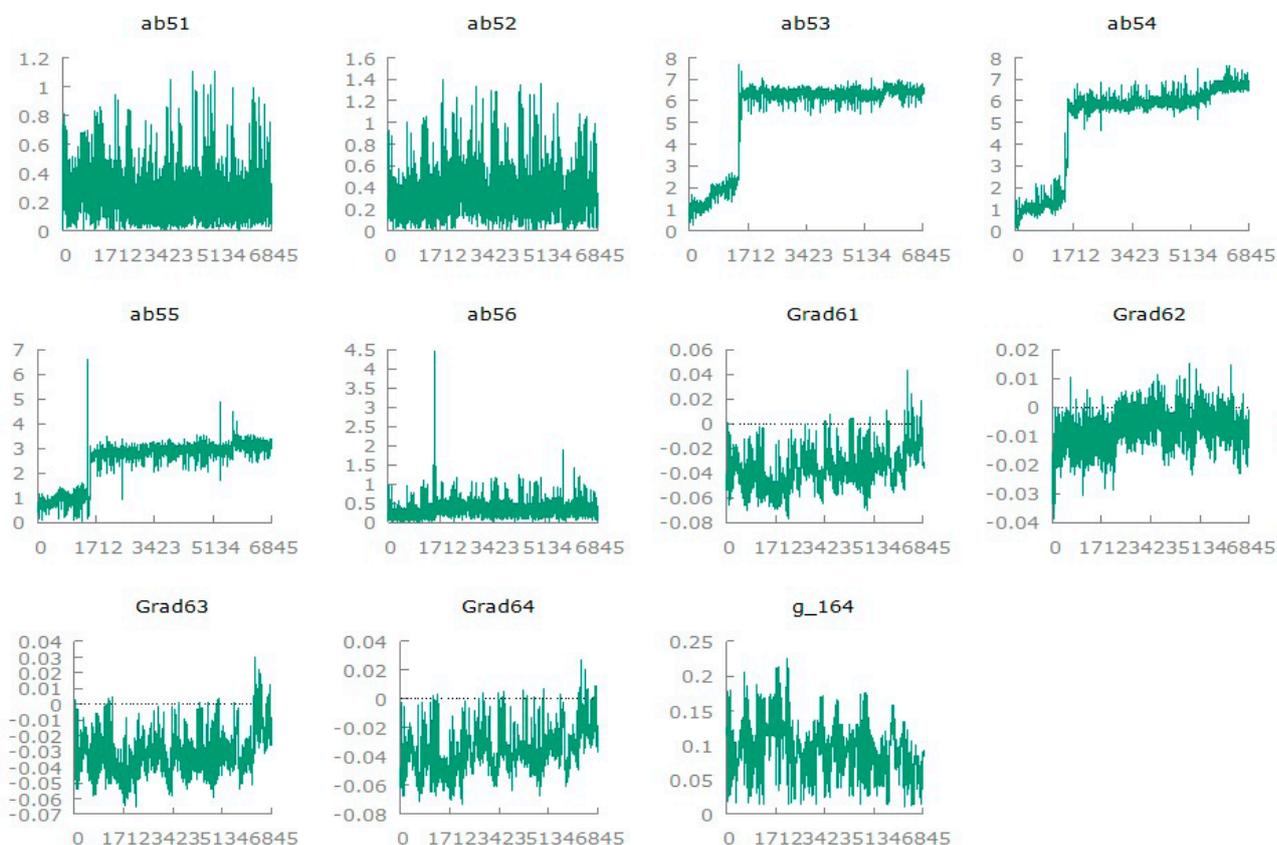


Рис. 2. Графики изменения углов, трещин и показаний инклинометра на различных глубинах в точке VI (*ab*)

Таблица 4. Показатели Хёрста для временных рядов в точке VI

Временной ряд	Показатель Хёрста для исходного ряда	Показатель Хёрста для первой разности ряда
<i>ab51</i>	0,845809	0,16382
<i>ab52</i>	0,775990	0,186152
<i>ab53</i>	1,00954	0,369829
<i>ab54</i>	1,01946	0,346629
<i>ab55</i>	0,992976	0,358785
<i>ab56</i>	0,811934	0,348368
<i>Grad61</i>	0,915213	0,301739
<i>Grad62</i>	0,974057	0,21629
<i>Grad63</i>	0,907349	0,273398
<i>Grad64</i>	0,895485	0,293854
<i>g_164</i>	0,851632	0,235942

Оценка оползневой риска

Правило, по которому предлагается оценить риск, называют критерием. Одним из основных критериев в данной работе является понятие стационарности и нестационарности изучаемых временных рядов, которое характеризуется показателем Хёрста.

Однако опыт показывает, что при оценке меры риска недостаточно одного критерия, поэтому предлагается использовать векторную целевую функцию. Сегодня считается актуальной двухкритериальная постановка [6, 15, 16]. На множестве всех допустимых решений $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ ($\sum_{i=1}^n w_i = 1$) определяется векторная целевая функция $F(w) = (F_1(w), F_2(w))$, где $F_1(w)$ – величина ожидаемого дохода (математическое ожидание) в случае принятия решения w , а $F_2(w)$ – величина риска (дисперсия или среднее квадратичное отклонение ожидаемого дохода от его математического ожидания):

$$F_1(w) \rightarrow \max, F_2(w) \rightarrow \min. \quad (3)$$

При оценке оползневой риска величина ожидаемого дохода $F_1(w)$ обычно не требует рассмотрения, так как необходимость проведения противооползневых мероприятий переводит ее в разряд детерминированных зависимостей. Таким образом, наибольший интерес представляет функция риска $F_2(w)$, где для оценки риска среднее квадратичное отклонение целесообразно заменить коэффициентом вариации и добавить коэффициенты

асимметрии, эксцесса и показатель Хёрста. Таким образом, при оценке риска рекомендуется рассматривать четырехкритериальную задачу.

В общем случае предполагается, что все критерии минимизируются и являются соизмеримыми – вышеуказанные составляющие четырехкритериальной задачи удовлетворяют этому условию. Если критерии упорядочены по относительной важности, то можно рассматривать задачу лексикографической оптимизации [5]. Известны также прямые методы оценки альтернатив на базе решающих правил, использующие целевые функции вида MINMAX, MAXMIN, MINSUM, расстояние до идеальной точки и др. [5].

В исследовании использовался метод идеальной точки. Предложено рассматривать значение (расстояние) до идеальной точки, отображающей идеальное описание устойчивого склона в 4 независимых критериях: коэффициенте вариации (характеристика однородности данных), коэффициенте асимметрии (характеристика симметрии распределения), эксцессе (характеристика отсутствия «тяжелых хвостов» и выбросов); показателе Хёрста (характеризующего поведение скорости ползучести).

Если склон устойчив, то его идеальное описание в случае четырех критериев будет таким:

- коэффициент вариации $V \leq 0,3$ – наблюдения однородны (например, $V = 0,3$);
- коэффициент асимметрии $A_s = 0$ – распределение симметрично;
- эксцесс $Ex = 0$ – отсутствие «тяжелых хвостов» и выбросов;
- показатель Хёрста $H = 0,5$ – стационарность.

Поэтому целесообразно использовать метод идеальной точки в критериальном пространстве $a = (H, Ex, As, V)$. Координаты – упорядоченные критерии $H \geq Ex \geq As \geq V$ с весами λ_j (например: $\lambda_1 = 0,5$; $\lambda_2 = 0,3$; $\lambda_3 = 0,1$; $\lambda_4 = 0,4$).

Расстояние до идеальной точки для каждого уровня измерений инклинометров (ab_{ij}) можно записать с использованием формулы расстояния Евклида:

$$\rho(\lambda, ab_{ij}) = \sum_{i=1}^4 \times \sqrt{\lambda_1(H_{ij} - 0,5)^2 + \lambda_2(Ex_{ij} - 0)^2 + \lambda_3(As_{ij} - 0)^2 + \lambda_4(V_{ij} - 0,3)^2} \quad (4)$$

Еще одной характеристикой оползневого риска является радиус кривизны – величина, характеризующая отклонение кривой от прямой (поверхности от плоскости), которая для окружности рассчитывается как $1/R$.

Используя формулу (4), найдем расстояния от идеальной точки до каждого значения критериального пространства, полученного по результатам измерений инклинометров (табл. 5). Для каждой скважины найдем среднее расстояние до идеальной точки и с его помощью определим радиус кривизны последовательно измеренных каждых 4 метров глубины скважин для упорядочивания группы по оползневому риску. Наибольший риск появления оползневого процесса имеет скважина 5 и далее, в порядке убывания риска, – 1, 4, 2, 3.

По архивным данным установлено, что постоянная ежегодная активизация оползня в исследуемом районе наблюдается с 1973 г. со времени начала строительства новой автострады. В результате планировочных подрезок склона активизировались процессы выветривания. Сравнительно быстро и резко изменился вещественный состав коренных пород олигоцен и ухудшились их прочностные свойства.

На теле оползня выделены два наиболее опасных очага (рис. 3), что соответствует результатам классификации скважин по группам риска (табл. 5).

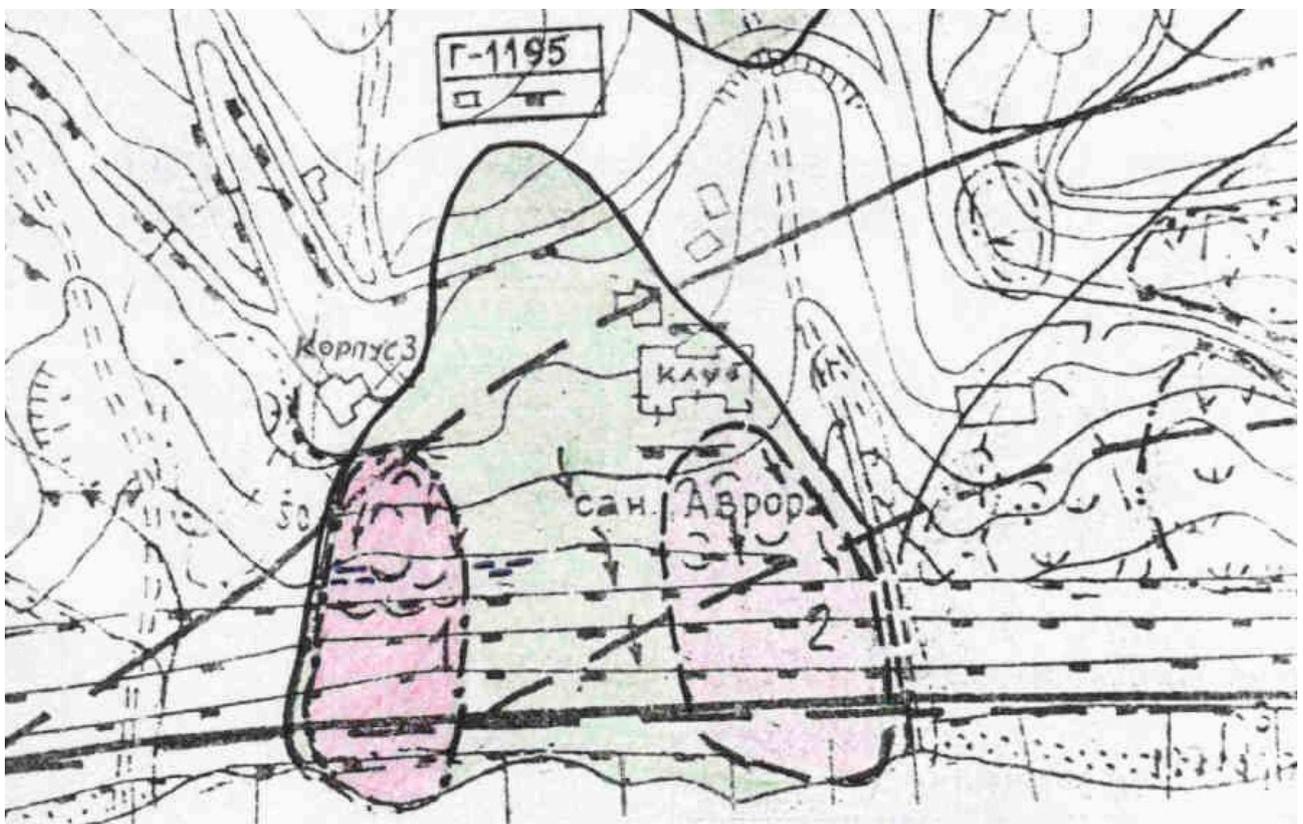


Рис. 3. Карта тела оползня

Таблица 5. Классификация скважин по группам риска

<i>I</i>	<i>G</i>	<i>Average</i>	σ	<i>As</i>	<i>Ex</i>	<i>V</i>	<i>H</i>	ρ	$\bar{\rho}$	Группа риска
<i>ab11</i>	24	1,786	0,831	-1,097	-0,389	0,465	1,056	0,654	0,594	II
<i>ab12</i>	20	1,450	0,876	0,496	-0,991	0,604	1,037	0,632		
<i>ab13</i>	16	2,904	2,811	0,655	-1,316	0,968	1,057	0,795		
<i>ab14</i>	12	0,332	0,152	0,333	-0,138	0,458	0,825	0,285		
<i>ab15</i>	8	0,782	0,289	0,028	-0,390	0,369	1,056	0,431		
<i>ab16</i>	4	0,908	0,427	0,574	1,422	0,471	0,982	0,768		
<i>ab21</i>	24	0,397	0,222	0,877	0,321	0,558	0,972	0,541	0,550	IV
<i>ab22</i>	20	0,541	0,338	0,923	0,167	0,625	1,032	0,573		
<i>ab23</i>	16	0,436	0,183	0,400	0,455	0,420	0,902	0,395		
<i>ab24</i>	12	1,719	1,020	0,116	-0,604	0,593	1,071	0,497		
<i>ab25</i>	8	1,990	1,220	0,080	-1,085	0,613	1,095	0,651		
<i>ab26</i>	4	0,703	0,341	-0,074	-1,164	0,485	1,027	0,644		
<i>ab31</i>	24	0,898	0,366	0,103	-0,283	0,408	1,034	0,402	0,358	V
<i>ab32</i>	20	0,597	0,185	-0,303	0,147	0,309	0,774	0,245		
<i>ab33</i>	16	0,953	0,209	-0,192	-0,210	0,219	0,930	0,331		
<i>ab34</i>	12	0,506	0,191	0,068	0,245	0,376	0,972	0,354		
<i>ab35</i>	8	0,491	0,171	0,144	-0,088	0,347	0,908	0,299		
<i>ab36</i>	4	1,290	0,364	-0,826	0,378	0,282	0,956	0,518		
<i>ab42</i>	20	0,229	0,153	1,457	2,742	0,666	0,852	1,415	0,559	III
<i>ab43</i>	16	0,386	0,172	0,454	-0,084	0,445	0,979	0,400		
<i>ab44</i>	12	0,318	0,148	0,589	0,568	0,467	0,874	0,455		
<i>ab45</i>	8	0,416	0,167	0,047	-0,273	0,402	0,806	0,251		
<i>ab46</i>	4	0,375	0,154	0,200	-0,187	0,412	0,847	0,276		
<i>ab51</i>	24	0,263	0,164	1,320	2,280	0,623	0,846	1,208		
<i>ab52</i>	20	0,351	0,205	1,361	2,508	0,584	0,776	1,294		
<i>ab53</i>	16	5,320	1,946	-1,414	0,155	0,366	1,010	0,732		
<i>ab54</i>	12	5,031	2,072	-1,260	-0,155	0,412	1,019	0,677		
<i>ab55</i>	8	2,461	0,889	-1,154	0,000	0,361	0,993	0,623		
<i>ab56</i>	4	0,357	0,198	2,562	29,866	0,553	0,812	13,408		

Алгоритм анализа и оценки оползневого риска по результатам геотехнического мониторинга

Данные, полученные по результатам геотехнического мониторинга, представляют собой многомерные временные ряды, которые имеют большой объем. Мониторинг решает задачи текущего состояния и прогнозирования изменения в поведении грунтов при возведении и эксплуатации природно-технических сооружений.

Результаты описания теории временных рядов и их использование на модельной задаче (проанализировано более 150 временных рядов, в том числе более 90 – по резуль-

татам измерений инклинометров) позволили прийти к выводу о том, что неустановившаяся (затухающая) ползучесть без риска перехода в установившуюся или прогрессирующую, идентифицируется на основании данных показателя Хёрста, характеризующего скорость изменения наблюдений.

Алгоритм анализа и оценки оползневого риска универсален и применим ко всем видам измерений параметров изучаемого объекта (геодезические наблюдения, гидрогеологические наблюдения, геофизические наблюдения

и т. д.). Рекомендуем в первую очередь анализировать данные с инклинометрических скважин, так как есть возможность определить одну из самых важных характеристик оползневого тела – глубину залегания поверхности скольжения оползня.

Предлагаемый алгоритм анализа и оценки оползневого риска по результатам изучения данных мониторинга заключается в выполнении следующей последовательности шагов.

1. Получить результаты геотехнического мониторинга; если участок наблюдений протяженный и по всей его длине снимались различного рода геотехнические показания, то необходимо разбить участок на группы.

2. Загрузить результаты в программный пакет GRETL, характеризовать каждую группу изменений показателем Хёрста ($H < 0,5$ – затухающая ползучесть, $H > 0,5$ – установившаяся ползучесть, $H > 1$ – прогрессирующая ползучесть).

3. Если показатель Хёрста $H > 1$, фиксируется прогрессирующая ползучесть (активно-

развивающийся оползневой процесс, аварийно-опасный участок; требуется срочное реагирование для предотвращения чрезвычайной ситуации).

4. Если показатель $H > 0,5$, это свидетельствует об установившейся ползучести (активный оползневой процесс, аварийно-опасный участок; требуется оперативное реагирование). Необходимо использовать понятие радиуса кривизны в пространстве состояний (H, Ex, As, V) для упорядочивания групп по степени риска.

5. Если $H < 0,5$, то это затухающая ползучесть (постепенное восстановление устойчивости). Предлагается использовать метод идеальной точки и понятие радиуса кривизны в пространстве состояний (H, Ex, As, V) для упорядочивания групп по степени риска.

6. Применять полученные результаты для принятия решений о проведении противооползневых мероприятий.

Выводы

Мелиорация может быть особенно эффективной при смягчении неблагоприятных условий, в том числе механических воздействий, таких как оползневые процессы, ветровая и водная эрозия. Надежная и рациональная эксплуатация противоэрозионных, противооползневых, водоотводящих систем требует организации наблюдений за грунтовыми природоохраняемыми сооружениями.

В статье предложен алгоритм для решения задачи упорядочивания областей оползнево-

го цирка по степени риска, предполагающий рассматривать результаты геотехнического мониторинга с точки зрения временных рядов. Для выявления случайных и неслучайных тенденций использовались показатель Херста и метод идеальной точки.

На реальном объекте показаны возможности применения данного алгоритма анализа временных рядов для упорядочивания по степени риска инклинометрических скважин, расположенных линейно в оползневом цирке.

Библиографический список

1. Безуголова, Е. В. Оползневой риск транспортных природно-технических систем : монография / Е. В. Безуголова, С. И. Маций, В. В. Подтелков. – Краснодар : КубГАУ, 2015. – 239 с.
2. Кузнецов, Е. В. Сельскохозяйственный мелиоративный комплекс для устойчивого развития агроландшафтов : учеб. пособие / Е. В. Кузнецов, А. Е. Хаджиди. – СПб. : Лань, 2018. – 300 с.
3. Кузнецов, М. С. Эрозия и охрана почв : учебник для вузов / М. С. Кузнецов, Г. П. Глазнов. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва : Юрайт, 2021. – 387 с.
4. Маслов, Н. Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов : учебник для вузов / Н. Н. Маслов. – Москва : Высш. школа, 1982. – 511 с.
5. Маслов, Н. Н. Физико-техническая теория ползучести глинистых грунтов в практике строительства / Н. Н. Маслов. – Москва : Стройиздат, 1984. – 176 с.
6. Перепелица, В. А. Математические модели и методы оценки рисков экономических, социальных и аграрных процессов / В. А. Перепелица, Е. В. Попова. – Ростов н/Д. : Изд-во Рост. ун-та, 2002. – 208 с.

7. Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве : СП 305.1325800.2017. – Введ. 18.04.18. – Москва : Минстрой России, 2018. – 56 с.
8. Основания зданий и сооружений : СП 22.13330.2011. – Введ. 20.05.11. – Москва : Минрегион России, 2011. – 161 с.
9. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния : ГОСТ 31937-2011. – Введ. 27.12.12. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 54 с.
10. Рекомендации по мониторингу и обследованию подпорных стен и удерживающих сооружений на оползневых участках автомобильных дорог : ОДМД 218.3.008-2011. – Рек. Управл. науч.-техн. исслед., информ. обеспечения и ценообразования, Управл. эксплуатации и сохранности автомобил. дорог Федер. дорож. агентства М-ва транспорта Рос. Федерации. – Москва : Росавтодор, 2011. – 43 с.
11. Брантон, Ст. Л. Анализ данных в науке и технике. Машинное обучение, динамические системы и управление / Ст. Л. Брантон, Дж. Н. Куц ; пер. с англ. А. А. Слинкина. – Москва : ДМК Пресс, 2021. – 542 с.
12. Эконометрика : учебник для магистров / И. И. Елисеева [и др.] ; под ред. И. И. Елисеевой. – Москва : Юрайт, 2014. – 453 с.
13. Кацко, А. И. Когнитивное моделирование и прогнозирование развития оползней в пространстве состояний / А. И. Кацко, Д. И. Кацко, В. С. Маций // Системный анализ в проектировании и управлении : сб. науч. тр. XXV Междунар. науч. и учеб.-практ. конф., С.-Петербург, 13–14 окт. 2021 г. : в 3 ч. / С.-Петербург. политехн. ун-т Петра Великого ; В. Н. Волкова, В. Н. Козлов (отв. ред.). – СПб : Политех-пресс, 2021. – Ч. 1. – С. 342–345.
14. Калуж, Ю. А. Показатель Хёрста и его скрытые свойства / Ю. А. Калуж, В. М. Логинов // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2002. – Т. 5, № 4 (12). – С. 29–37.
15. Райзер, В. Д. Вероятностные методы в анализе надежности и живучести сооружений / В. Д. Райзер. – Москва : АСВ, 2018. – 396 с.
16. Маций, С. И. Оценка оползневого риска транспортных сооружений : монография / С. И. Маций, Е. В. Безуглова, Д. В. Плешаков. – Краснодар : КубГАУ, 2015. – 120 с.

Поступила 5 сентября 2023 г.