

УДК 519.85:551.435.627/628  
DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-1-45-58

## Математическое моделирование динамики перемещений оползневых склонов в условиях техногенных воздействий

В. С. Хорошилов<sup>1</sup>, О. Г. Павловская<sup>1\*</sup>, Н. Н. Кобелева<sup>1</sup>, Х. К. Ямбаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), г. Москва, Российская Федерация

\* e-mail: pavlovskaya@ssga.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются особенности математического моделирования напряженно-деформированного состояния оползневых склонов для прогнозирования их перемещений. Регулярный контроль и мониторинг экзогенных геологических процессов являются важными элементами качественной оценки оползневых явлений, включая как своевременное выявление участков с наибольшей опасностью, так и ликвидацию их последствий. Рассматриваются природные и техногенные особенности района исследования. Приводятся предшествующие результаты обработки данных геодезических наблюдений, являющихся основой для математического моделирования напряженно-деформированного состояния оползневых склонов и для прогнозирования их перемещений. На основе преобразования Фурье проведено спектральное исследование вертикальных перемещений оползневых знаков и сделан анализ полученных спектрограмм. Моделирование перемещений оползневых склонов, подверженных техногенным воздействиям (проведение взрывных работ и вывоз большого количества грунта), реализуется на основе прогнозной динамической модели. Модель представлена в рекуррентной форме в виде двух первых условных моментных функций, что позволило прогнозировать перемещения контролируемых оползневых склонов с достаточно высокой точностью.

**Ключевые слова:** оползневый склон, геодезические наблюдения, центрированные составляющие перемещений, преобразование Фурье, спектрограммы перемещений, математическое моделирование, прогнозная модель

### Введение

Интенсивное пространственное и экономическое развитие территории Российской Федерации, а также реализация масштабных проектов реорганизации и формирования новых экономически значимых промышленных зон, настоятельно требуют проработки различных аспектов их безопасной и бесперебойной работы. В связи с этим существенное внимание должно уделяться исследованиям экзогенных геологических процессов в сложных геоморфологических условиях, которые могут оказать существенное влияние на работу ключевых звеньев различных производственных зон. Значимость комплексного исследования склоновых процессов в этом случае бесспорна, однако, по мнению авторов, геодезические методы исследования пока все еще используются недостаточно эффективно [1]. К ним мы относим не только результаты наблюдений за пере-

мещениями оползневых склонов, но и топографическую информацию о рельефе местности, ориентировании склонов, а также другие ландшафтные признаки, оказывающие существенное влияние на особенности движения склоновых масс [2–7]. Ранее в работе [8] нами были рассмотрены в достаточно полной мере реализуемые в настоящее время методы и средства выявления и моделирования перемещений оползневых участков с целью эффективного управления рисками.

В качестве объекта исследования был выбран оползневый склон, на котором в течение 9 лет геодезическими методами (нивелирование III класса) выполнялись наблюдения за вертикальными перемещениями двух групп оползневых знаков (8021, 8022, 8023, 8024, 8025) и (8061, 8062, 8063), сохранившихся после взрывов (рис. 1). Наблюдения охватывали полосу берега реки протяженностью 2,5 (вдоль) на 1,5 км (поперек).

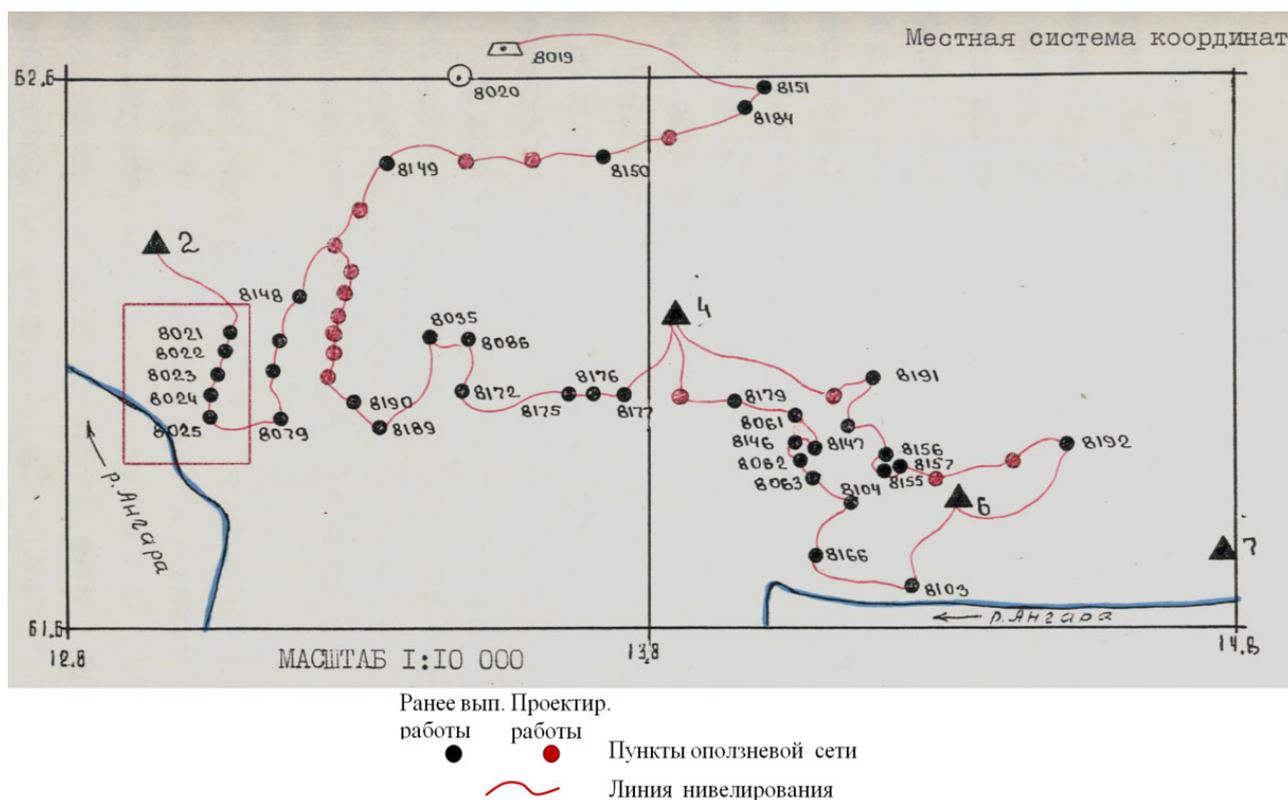


Рис. 1. Схема оползневой сети

Изначально имелись все основания предположить, что одними из основных воздействующих факторов, влияющих на перемещение оползня, стали взрывные работы с последующим перемещением больших масс грунта в кавальеры скальных пород плотины и изменение уровня подземных вод [9]. Однако конкретные данные о местах, времени и мощности произведенных взрывов, а также разгрузке оползневых склонов, отсутствовали. Последующие исследования подтвердили наше предположение о влиянии техногенных воздействий на вертикальные и горизонтальные перемещения оползневых знаков. Кроме того, взрывные работы нашли отклик в колебании уровня воды в р. Ангаре и колебаниях уровня грунтовых вод. Особого внимания заслуживает оценка влияния разгрузки оползневого склона, вызванная вывозом грунта из карьеров горных пород, что оказывает неоднозначное воздействие на развитие оползневых явлений: с одной стороны, вывоз грунта уменьшает тяжесть береговой массы и снижает касательную к склону (составляющую действующей силы), что повышает устойчивость склона; с другой стороны, вы-

емка грунта приводит к уменьшению составляющей силы, действующей перпендикулярно склону, снижая силы трения, что повышает мобильность оползня.

Очевидно, что и такие сопутствующие явления, как колебания уровней грунтовых вод и воды в р. Ангаре, изменение солнечной радиации, температуры воздуха и атмосферных осадков также следует отнести к числу важных, часто взаимосвязанных и опосредованно действующих на перемещения оползневых знаков, факторов. Выполненные исследования позволяют лучше понять механизм протекающих оползневых процессов и обосновать более надежные прогнозы для их последующего анализа и оценки.

#### **Гидрологическая оценка неустойчивости правобережья реки Ангары в зоне примыкания плотины**

Общая картина и возможность оценки оползневых явлений с учетом многолетних наблюдений может быть представлена следующим образом:

– падение горных пород под углом до  $15^\circ$  в сторону р. Ангары и наличие ранее обнаруженной серии тектонических нарушений в районе проведения работ создают предпосылки для возникновения оползневых явлений;

– расположение ослабленных горных пород, склонных к пластическим деформациям с малыми значениями коэффициентов внутреннего трения и сцепления грунтов, определяют масштаб, место и время проявления оползней в зависимости от техногенных и природных воздействий;

– вследствие большой неоднородности литологического состава горных пород, их трещиноватости, степени и времени обводнения, а также воздействия неблагоприятных факторов стохастического характера, детерминированный прогноз местоположения, масштаба и времени действия конкретного оползня известными методами механики горных пород и грунтов невозможен.

Для достоверной оценки и прогнозирования поведения оползня на основе количественных результатов геодезических и иных наблюдений необходимо представить более качественную оценку влияния ряда природных и техногенных воздействующих факторов на общие закономерности развития оползневых явлений. С этих позиций оценим влияние гидрологических условий, атмосферных осадков и взрывных работ на проявление оползневых процессов. При этом подземные воды в сочетании с вышеописанными условиями в большей степени определяют широкий спектр оползневых явлений:

– выше уреза воды р. Ангары и уровня грунтовых вод, т. е. почти повсеместно в пределах зоны аэрации при наличии прослоев и относительно тонких слоев слабопроницаемых пород, может возникать верховодка. Подземные воды такого типа предопределяют возникновение наибольших локальных оползней;

– в зоне колебания уровня грунтовых вод, происходящих за счет колебаний уровня р. Ангары и выпадения атмосферных осадков, возникают условия для проявления обширных поверхностей скольжения. Моноклиналиное залегание горных пород и их расположение выше уреза воды р. Ангары позволяет считать такие поверхности плоскими,

а мощность оползневых блоков распространяется от поверхности земли до среднего уровня грунтовых вод;

– расположение ослабленных полускальных глинистых горных пород ниже уровня подземных вод, ослабляющее воздействие гидростатического взвешивания напорными подземными водами, и наличие региональных тектонических нарушений создают условия для возникновения крупных региональных оползней с поверхностью скольжения ступенчатой или криволинейной формы и глубиной залегания ниже уровня уреза воды р. Ангары. Эти оползневые подвижки в сочетании с более мелкими подвижками поверхностного характера представляют наибольшую угрозу правобережному примыканию плотины Богучанской ГЭС, являющейся практически единственным энергетическим узлом для большого числа региональных производственных цепочек. В связи с этим отметим имеющие место небольшие подвижки пунктов опорной геодезической сети, что может также служить подтверждением существования подобных региональных блоков.

Атмосферные осадки, повышая влажность ослабленных слоев, оказывают небольшое влияние на оползневые явления в зоне аэрации, однако они формируют верховодку, что существенно воздействует на возникновение оползней локального характера.

Взрывные работы, выполняемые на правобережном склоне р. Ангары, влияют на образование оползней через подземные воды. Непосредственное влияние происходит за счет продольных и поперечных волн в горных породах, степень воздействия которых зависит от мощности взрывов и их расстояний от ослабленных зон. Воздействие взрывов приводит к колебанию уровня грунтовых или напорных вод пьезометрического уровня за счет продольных волн, воздействующих на водовмещающие горные породы. При этом степень воздействия искусственных колебаний уровня грунтовых вод на оползневые явления незначительна в сравнении с естественными факторами, поскольку время и амплитуда их воздействий невелики.

Изменение же пьезометрического уровня, характеризующее переменное гидростатическое взвешивание горных пород (чередующе-

еся воздействие изменяющегося веса горных пород на ослабленный слой), усугубляет воздействие напорных подземных вод на возникновение региональных оползней. В определенной степени данное обстоятельство можно отнести к проявлению наведенной сейсмичности.

Приведенная характеристика инженерно-геологической оценки влияния сложившихся условий и основных воздействующих факторов на развитие оползней указывает на наличие трудностей в представлении однозначной интерпретации наблюдаемых оползневых процессов геодезическими методами.

### Методы исследования

**Анализ данных геодезических наблюдений за оползневом процессом.** Анализ протекающих оползневых процессов осуществлялся на основе обработки многократных цикловых наблюдений за перемещениями знаков локальных геодезических сетей с одновременным решением задачи о стабильности пунктов конкретной сети. При этом следует отметить, что межцикловые интервалы времени наблюдений значительно различались между собой, а выполнение циклов не охватывало кульминаций и спадов техногенных воздействий. Но даже в условиях неполноты информации было выявлено чередование во времени отрицательных и положительных вертикальных перемещений оползневых

знаков [2]. Очевидно, что отрицательные перемещения были обусловлены естественным скольжением оползня вниз по склону, значительно усиленным в результате воздействия проводимых взрывных работ. А положительные перемещения возникали вследствие разуплотнения грунта после снятия в процессе разгрузки так называемого бытового давления. Для подтверждения обнаружившихся особенностей реакции оползневого склона на взрывы и разгрузку были скорректированы высоты всех знаков оползневой сети методом Ю. Е. Федосеева [10], что позволило в условиях взаимной неустойчивости перемещающихся пунктов определить их собственные относительные смещения и тем самым найти фактические высоты. Данным методом были скорректированы высоты всех исследуемых оползневых знаков, т. е. были получены оценки их фактических высот в виде отдельного конструирования отрицательных и положительных трендов перемещений, отражающих различную природу реакции оползневого склона на взрывы и разгрузку (рис. 2). По скорректированным высотам были рассчитаны скорости межцикловых перемещений знаков и выполнена оценка их точности. Таким образом, было выполнено нормирование контролируемых параметров процесса, позволившее в последующем осуществлять сравнительный анализ его развития безотносительно продолжительности межцикловых промежутков времени.

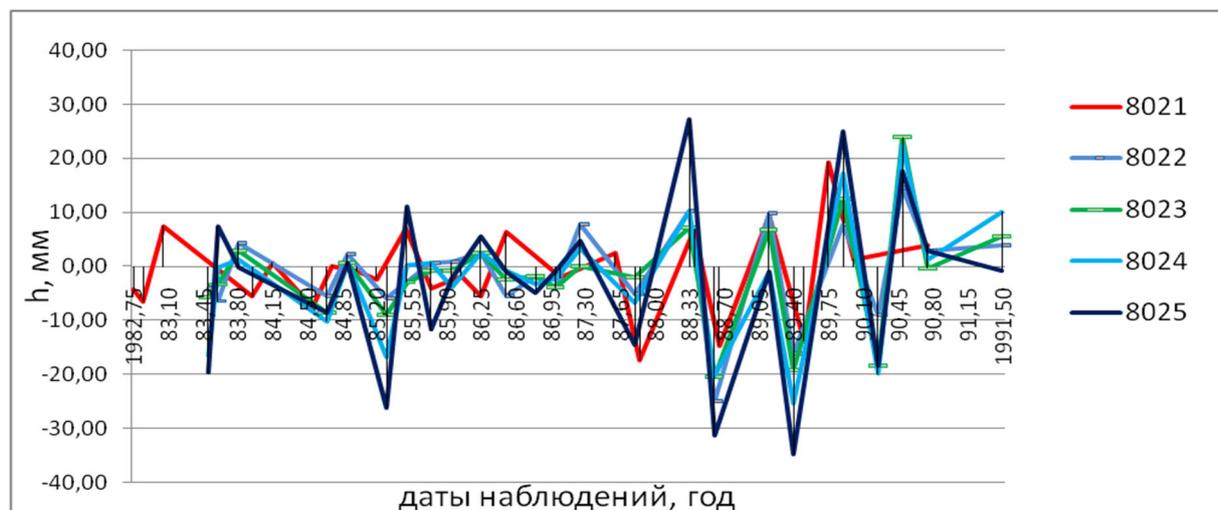


Рис. 2. Разнознаковые составляющие процесса вертикальных перемещений при взрывных работах и разгрузке оползневых склонов

Далее производилось раздельное центрирование вышеуказанных составляющих процесса, в результате которого выявился характер двух видов влияния техногенных воздействий в форме изменений во времени средних значений перемещений, зафиксированных наблюдениями. При этом центрированные значения обеих составляющих процесса отражают преимуще-

ственно естественный характер его развития с малой долей влияния техногенных воздействий. Поэтому они оказались близкими между собой, что позволило объединить центрированный процесс в пять реализаций путем осреднения его значений по близко расположенным соседним сечениям и включения значений отдельных удаленных сечений (рис. 3).

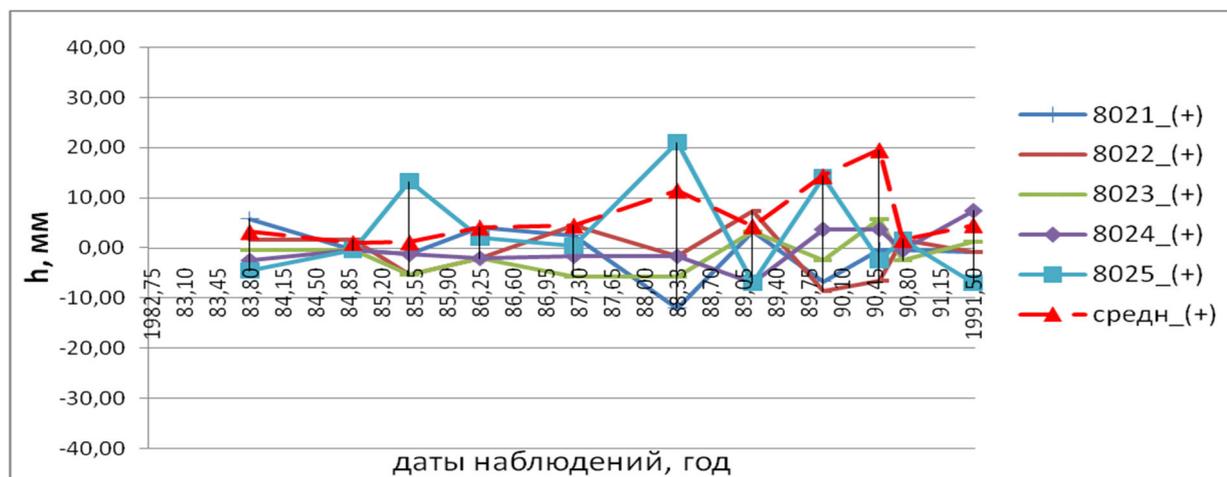


Рис. 3. Объединенный центрированный процесс положительной и отрицательной составляющих в виде пяти реализаций

Отметим следующее важное обстоятельство. Процедура раздельного центрирования минусовой и плюсовой составляющих перемещений оползневого склона позволила установить неизвестный ранее характер влияния во времени и по интенсивности двух основных воздействующих факторов техногенного характера, результатом чего явились изменения средних значений перемещений оползневых знаков, наблюдаемых геодезическими методами. При этом вычисленные центрированные значения минусовой и плюсовой составляющих перемещений характеризуют развитие оползневого процесса, свободного от влияния техногенных воздействий, следовательно, в таком виде их можно рассматривать как составляющие единого процесса.

**Математическая модель динамического типа.** Математические модели динамического типа описывают процессы деформаций с учетом

совместного влияния времени и главных возмущающих факторов. Получаемые благодаря математическому моделированию прогнозные результаты могут явиться ключевым инструментом для формирования знаний о состоянии объекта с целью принятия управляющих решений при оценке возможных рисков. В этом плане динамические модели более совершенны в сравнении с другими, так как имеют подвижную структуру, соответствующую физической сущности развития процесса: учитывают инерционный характер взаимодействия оползневого процесса и воздействующих факторов и их изменения во времени [11, 12]. Так, например, модель типа «вход-выход» со структурой в виде инерционного звена второго порядка, описывающая процесс перемещения произвольно выбранного оползневого знака под воздействием двух основных воздействующих факторов, имеет следующее рекуррентное выражение:

$$x_k = \varphi_1 x_{k-1} + \varphi_2 x_{k-2} + \beta_1 Z_k + \beta_2 V_k + \gamma \omega_k, \quad (1)$$

где  $x_k$  – выходная переменная, т. е. значение перемещения оползневого знака на  $k$ -м шаге дискретизации;  $Z_k, V_k$  – вход, выраженный значениями двух основных воздействующих факторов (изменение массы заряда при проведении взрывных работ и изменение объема извлекаемого грунта);  $\omega_k$  – шумовая компонента;  $\varphi_1, \varphi_2$  – коэффициенты динамики, отражающие соответственно степень влияния на величину перемещения  $x_k$  значений  $x_{k-1}, x_{k-2}$ ;  $\beta_1, \beta_2, \gamma$  – коэффициенты, характеризующие степень влияния на величину  $x_k$  значений  $Z_k, V_k$  и  $\omega_k$ .

Оценивание параметров модели осуществлялось в процессе поэтапной процедуры метода наименьших квадратов путем аппроксимации двух первых моментных функций, т. е. на начальном этапе оцениваются параметры модели в результате минимизации функционала вида  $F(\varphi_1, \varphi_2, \beta_1, \beta_2) = \sum_{k=2}^N (x_k - \hat{x}_{k/k-1})^2$ , для которого условное математическое ожидание представляется выражением

$$M\{x_k / x_{k-1}, u_k\} = \hat{x}_{k/k-1} = \hat{\varphi}_1 x_{k-1} + \hat{\varphi}_2 x_{k-2} + \hat{\beta}_1 Z_k + \hat{\beta}_2 V_k.$$

При этом оценки параметров  $\hat{\varphi}_1, \hat{\varphi}_2, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$  находят из решения соответствующей системы нормальных уравнений. На конечном этапе осуществляется минимизация функционала, выраженного через условную корреляционную функцию.

Для определения порядка модели авторегрессии и выполнения окончательного этапа оценивания вычисляются асимптотически несмещенные оценки корреляционной функции по остаточным ошибкам моделирования с использованием выражения [13]

$$K_\varepsilon[m] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-m} \varepsilon_k \varepsilon_{k+m}, \quad (2)$$

где временной сдвиг  $m = 0, 1, 2, \dots, M < N$ .

Величины остаточных ошибок  $\varepsilon_k$  могут быть рассчитаны как разность между реальными перемещениями и их соответствующими аппроксимированными значениями:

$$\varepsilon_k = x_k - \hat{x}_{k/k-1} = \gamma \omega_{k-1}. \quad (3)$$

Выбор порядка авторегрессии осуществляется на основе графиков корреляционной функции. В нашем случае для описания процесса шума была использована модель, имеющая вид

$$\omega_k = \mu \omega_{k-1} + \eta \omega_{k-2} + \xi_k, \quad (4)$$

где  $\mu, \eta$  – оцениваемые параметры.

Оценка параметров  $\mu, \eta$  производится путем минимизации функционала вида [11]

$$F_2(\mu, \eta) = \sum_{m=1}^M (\hat{K}_\varepsilon[m] - \mu \hat{K}_\varepsilon[m-1] - \eta \hat{K}_\varepsilon[m-2])^2. \quad (5)$$

**Элементы спектральной оценки влияния воздействующих факторов.** Для оценки влияния выявленных техногенных и отдельных метеорологических факторов (имеющих гармониче-

ский характер развития во времени) на перемещение оползневых знаков использовался математический аппарат спектрального анализа временных рядов. Сущность спектрального анализа состояла в представлении совокупности операций, позволяющих представить периодическую функцию  $X(t)$  в виде суммы гармонических составляющих и определить параметры каждой из них. Для этого временная последовательность представлялась в виде ряда [14]

$$X(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^N (a_k \cos 2\pi f_k t + b_k \sin 2\pi f_k t), \quad (6)$$

где  $f_k = K/T$  – частота;  $T$  – период гармонического процесса;  $K = 1, 2, 3, \dots, N$ ;  $a_k, b_k$  – соответствующие реальные и мнимые компоненты спектра, которые могут быть вычислены с использованием выражений:

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^N (t_n) \cos \frac{2\pi K t_n}{N}; \quad b_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^N (t_n) \sin \frac{2\pi K t_n}{N}, \quad (7)$$

где  $N$  – количество отсчетов.

Амплитудная характеристика рассматривалась как

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}. \quad (8)$$

Зависимость амплитуды от частоты может быть представлена графически, когда по одной оси откладываются частоты гармоник, а по другой – амплитудные характеристики этих частот. Анализируя спектрограмму гармонического процесса, разделив ее на несколько характерных областей, можно определить частоту каждой гармоники, ее период и амплитуду, а восстановив путем обратного преобразования Фурье исследуемую функцию на спектры в области низкочастотных колебаний, – выделить основную тенденцию развития исследуемого процесса, т. е. наклон функции к оси времени. От расчетных характеристик возможно перейти к анализу самого процесса деформации оползневого склона, описываемого динамической моделью. На данном этапе решаются задачи, связанные с выявлением степени влияния воздействующих факторов на величины возникающих при этом перемещений оползневых знаков.

В настоящем исследовании применялась следующая процедура анализа:

– вычисление преобразования Фурье от исследуемой функции;

- графическое представление амплитудного спектра в виде спектрограммы;
- разделение спектрограммы на характерные области;
- вычисление периода каждой гармоники из ее частоты;
- выполнение обратного преобразования Фурье в области низкочастотных колебаний для получения тенденции развития исследуемого процесса;
- на основании рассмотрения спектрограмм исследуемых процессов выявление тех, которые коррелируют между собой.

Приведенный математический аппарат использовался для анализа временных рядов: вертикальных перемещений статистически однородной первой (8021, 8022, 8023, 8024, 8025) и второй (8061, 8062, 8063) групп оползневых знаков. Данный аппарат также применялся и для анализа соответствующих воздействующих факторов: изменения уровня воды в р. Ангаре и среднемесячной температуры на метеостанции г. Богучаны, количества среднесуточных атмосферных осадков, объема вынимаемого грунта при разгрузке склона

и объема заряда при взрывных работах. Кроме того, рассматривались спектры и других метеорологических факторов (изменение уровня грунтовых вод, изменение атмосферного давления) и спектры горизонтальных перемещений оползневых реперов.

### Результаты

**Анализ спектрограмм вертикальных перемещений двух групп оползневых знаков.** В результате анализа временных работ получены спектрограммы исследуемых процессов (рис. 4–6). С помощью анализа спектрограмм (см. рис. 4) вертикальных перемещений двух групп оползневых знаков выделены две основные гармоники с частотами  $f_1 = 40$  и  $f_2 = 75$ , которые соответствуют полным периодам гармоник  $T_1 = 12$  месяцам и  $T_1 = 3$  месяцам. Рассмотрение спектрограмм воздействующих факторов позволило выявить следующие особенности, а именно: на спектрограммах природных воздействий также

наблюдались всплески на частоте  $f_1 = 40$ , что соответствует периоду  $T_1 = 12$  месяцам.

Очевидно, что данная гармоника обусловлена сезонными колебаниями воздействий природной среды. На спектрограмме вертикальных перемещений оползневых знаков первой группы отмечается резкий пик в районе нулевой частоты (см. рис. 4, а) и интенсивные низкочастотные колебания. При восстановлении этой области спектра была получена прямая линия с незначительным наклоном к оси времени, что может быть интерпретировано как тенденция развития вертикальных перемещений оползневых знаков.

На спектрограмме второй группы оползневых знаков (см. рис. 4, б) отмечен более пологий пик в районе нулевой частоты и более интенсивные низкочастотные колебания. При восстановлении этой области спектра была получена прямая линия с более значительным наклоном к оси времени, что говорит о том, что скорость вертикальных перемещений знаков второй группы выше, чем первой.

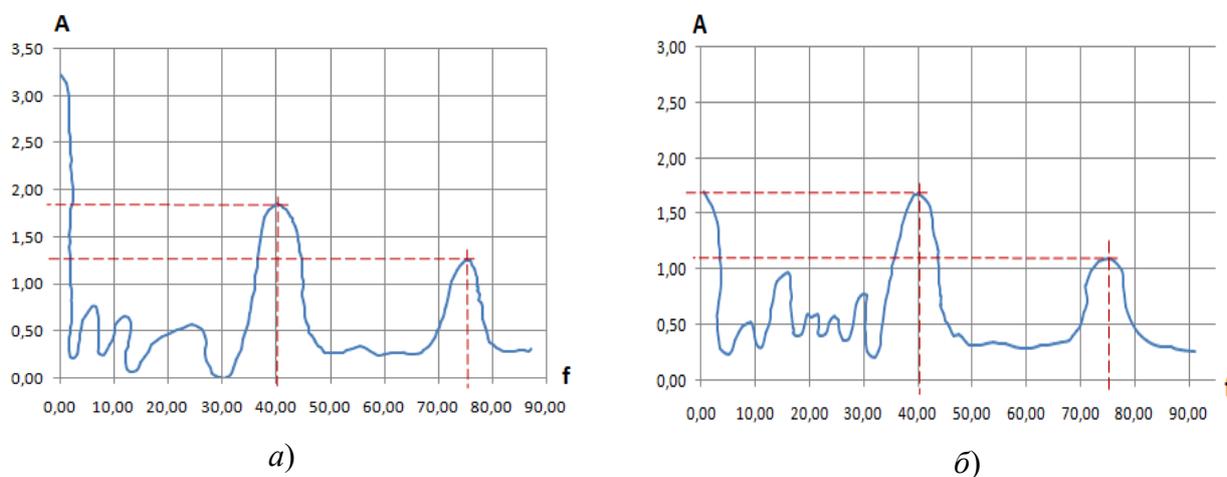


Рис. 4. Спектрограммы вертикальных перемещений:

а) 1-я группа оползневых знаков; б) 2-я группа оползневых знаков

Из анализа спектрограмм изменения объема вынимаемого грунта при разгрузке склона (рис. 5, а) и изменения величины заряда при проведении взрывных работ (рис. 5, б) наблюдается пик в районе частоты  $f_2 = 75$ , что соответствует периоду  $T_1 = 8$  месяцам. Отметим, что обе спектрограммы практически повторяют друг друга. Такая же частота отмечается и на спектрограммах вертикальных перемещений знаков. Это позволяет сделать вывод, что взрывные работы и работы по разгрузке склона являются воздействующими факторами на вертикальные перемещения оползневых знаков. Необходимо отметить, что на спектрограмме изменения уровня воды в р. Ангаре, кроме основной сезонной частоты  $f_1 = 40$ , отчетливо проявляется частота

$f_2 = 75$ ; это означает, что взрывные работы также оказывают влияние и на изменение уровня воды в р. Ангаре (рис. 6, б). Данное утверждение подтверждается тем, что на спектрограммах других метеорологических факторов пика на данной частоте не наблюдается.

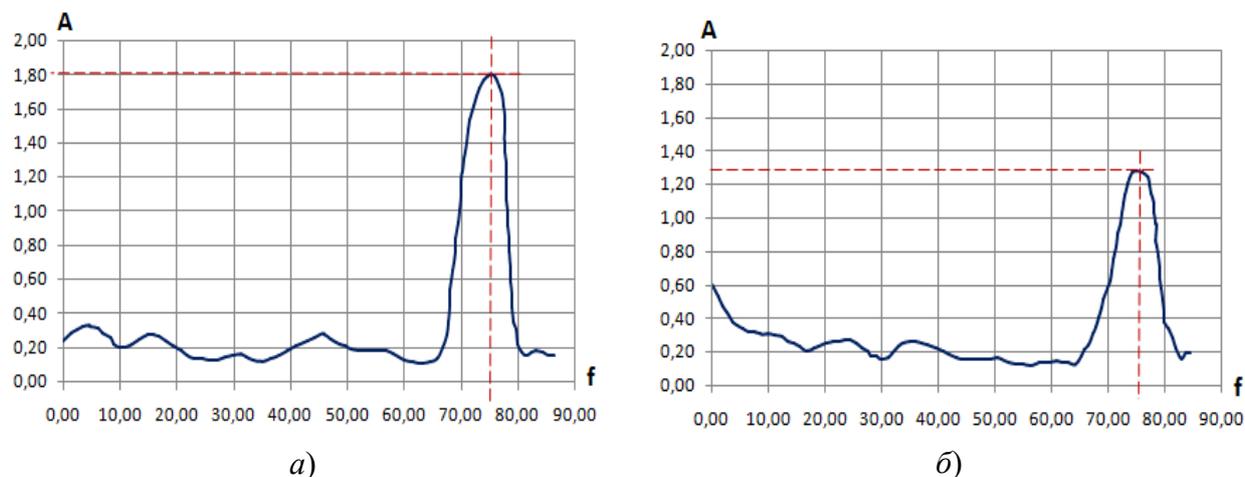


Рис. 5. Спектрограммы:

а) изменения объема вынимаемого грунта; б) изменения величины заряда при взрывных работах

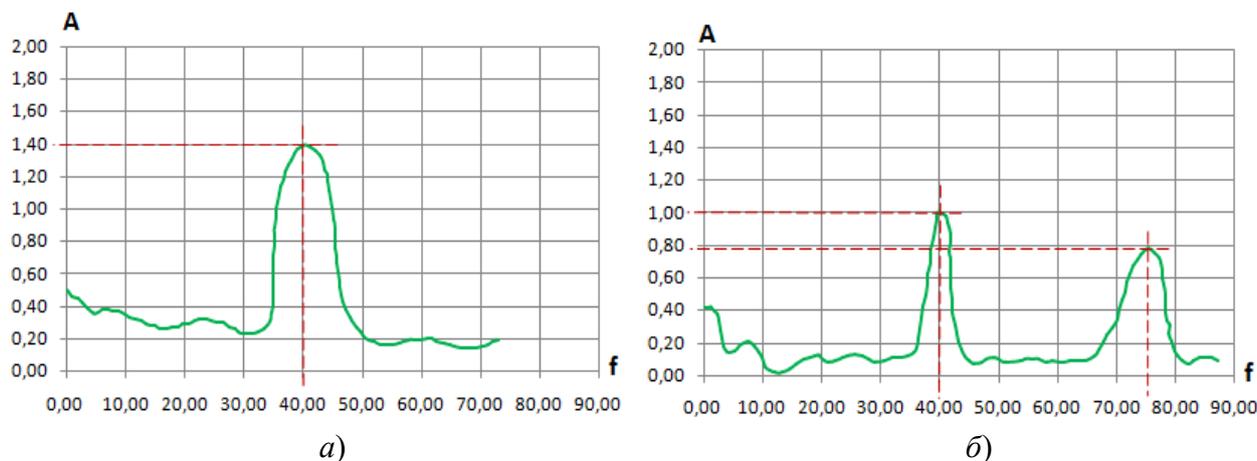


Рис. 6. Спектрограммы:

а) изменения температуры воздуха; б) изменения уровня воды в р. Ангаре

Результаты анализа спектрограмм для горизонтальных перемещений двух групп оползневых знаков показали, что они коррелируют с вертикальными перемещениями и на них воздействуют те же факторы, что и на вертикальные перемещения. Указанная периодичность воздействующих факторов на перемещения наблюдаемых оползневых знаков была выявлена по всей исследуемой территории правобережного оползневого склона.

Для уточнения периодичности этих воздействий выявлялся характер воздействий проводимых взрывных работ и работ по разгрузке склона. С этой целью устанавливались зависимости от времени: изменение объема заряда при проведении взрывных работ; изменение количества вынутого грунта при разгрузке склона в районе оползня; изменение количества насыпаемого грунта в районе кавальер скальных грунтов. Выбор этих областей для исследований

был обусловлен тем, что земляные работы по разгрузке оползневого склона и насыпь в кавальеры скальных грунтов проводились вблизи наблюдаемых геодезическими методами оползневых реперов (8061, 8062, 8063), а также тем, что данные работы велись в течение всех 9-летних наблюдений. Анализ вышеуказанных процессов показал, что земляные работы проводились с периодичностью 2 года при разгрузке склона и 3 года при последующем убывании их интенсивности, что позволяет представить более полную картину происходящих процессов.

**Моделирование перемещений, вызванных техногенными воздействиями на основе прогнозной математической модели.** Исследование реакции оползневого склона на техногенные воздействия выполнялось по результатам 9-летних наблюдений за вертикальными перемещениями оползневых знаков, надежно закрепленных на поверхности исследуемого объекта. Изучение графиков изменения контролируемых перемещений во времени показало, что количество циклов наблюдений и календарные сроки их выполнения не позволяют выявить сезонное влияние природных факторов, подавляемых техногенными воздействиями. При этом четко выразилось воздействие взрывных работ и разгрузки склонов в виде последовательных чередований минусовых и плюсовых значений перемещений, существенность которых была подтверждена оценкой точности геодезического контроля параметров перемещения и их скоростей. Математическое моделирование процессов развития отрицательных и положительных значений перемещений было выполнено отдельно, что позволило установить закономерности реакции склона на два вида техногенных воздействий. Моделирование осуществлялось в динамической форме в виде закона распределения изучаемого процесса, аппроксимированного во времени трендовой составляющей, стандартом и автокорреляционной функцией, что позволило оценить ожидаемую динамику оползней в данных или подобных условиях.

В ходе исследований для построения прогнозных математических моделей были использованы следующие входные воздействия:

- 1)  $Z_k$  – изменение массы заряда при проведении взрывных работ на протяжении всех циклов геодезических наблюдений;
- 2)  $V_k$  – изменение объема вывозимого грунта после проведения взрывных работ на протяжении всех циклов геодезических наблюдений.

В качестве выходного фактора  $x_k$  использовались значения перемещений оползневых знаков на  $k$ -м шаге дискретизации (уравнение по методу Ю. Г. Федосеева).

Период основания прогноза для построения прогнозных моделей составил 9 лет с дискретностью наблюдений 0,2 г.

Ниже представлена группа прогнозных математических моделей с двумя входными воздействиями  $x$  ( $Z_k, V_k$ ) и дискретностью наблюдений через каждые 0,2 г. для каждого оползневого знака (8021, 8022, 8023, 8024, 8025):

- оползневый знак 8021:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k/k-1} &= 0,9985x_{k-1} - 0,3583x_{k-2} + 2,3672Z_k - 1,9248V_k + 0,3196 + 0,5511\omega_k; \\ \omega_k &= 1,1676\omega_{k-1} - 0,2207\omega_{k-2}; \end{aligned} \quad (9)$$

- оползневый знак 8022:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k/k-1} &= 0,9906x_{k-1} - 0,4340x_{k-2} + 1,6273Z_k - 1,5672V_k + 0,4127 + 0,7389\omega_k; \\ \omega_k &= 1,0388\omega_{k-1} - 0,1499\omega_{k-2}; \end{aligned} \quad (10)$$

– оползневый знак 8023:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k/k-1} &= 1,1064x_{k-1} - 0,5172x_{k-2} + 1,4879Z_k - 1,0839V_k - 0,0502 + 0,9069\omega_k; \\ \omega_k &= 0,4165\omega_{k-1} - 0,2406\omega_{k-2}; \end{aligned} \quad (11)$$

– оползневый знак 8024:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k/k-1} &= 0,9974x_{k-1} - 0,3144x_{k-2} - 0,8206Z_k + 0,6765V_k - 0,1974 + 0,3224\omega_k; \\ \omega_k &= 1,2926\omega_{k-1} - 0,3480\omega_{k-2}; \end{aligned} \quad (12)$$

– оползневый знак 8025:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k/k-1} &= 0,9928x_{k-1} - 0,4427x_{k-2} - 4,9242Z_k + 4,2044V_k - 0,5048 + 1,7062\omega_k; \\ \omega_k &= 0,9824\omega_{k-1} - 0,1629\omega_{k-2}. \end{aligned} \quad (13)$$

В таблице представлены результаты значений средних квадратических ошибок  $m$ , рассчитанных по результатам расхождений между уравненными и аппроксимированными (по построенным моделям) перемещениями оползневых знаков.

Средние квадратические ошибки прогнозирования

Номер оползневого знака	8021	8022	8023	8024	8025
$m$ , мм	0,43	0,37	0,68	0,37	0,53

### Заключение

Обобщая результаты выполненных исследований, отметим следующее:

– полнота представления и анализа пространственной информации зависит от местоположения и густоты оползневых знаков, своевременности геодезических наблюдений за их перемещениями;

– для достоверного математического моделирования необходимо иметь полные количественные данные о процессах развития основных воздействующих факторов, влияющих на активность оползневых процессов, и зонах влияния этих факторов;

– утрата части оползневых знаков и их разреженность затруднили восстановление объективной пространственно-временной картины оползневых перемещений, вследствие чего нельзя было претендовать на исчерпывающую полноту и детальность анализа изучаемых процессов;

– корректный выбор входных воздействующих факторов и типа математической модели обеспечил возможность применения построенных математических моделей для прогнозирования перемещений наблюдаемых оползневых знаков при изучении динамики оползневого склона; средняя квадратическая ошибка прогнозирования составила величину в пределах 0,37–0,68 мм для различных оползневых знаков, что свидетельствует о высокой точности прогноза.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Симонян В. В. Изучение оползневых процессов геодезическими методами. – М. : МГСУ, 2011. – 172 с.
2. Хорошилов В. С., Павловская О. Г., Носков М. Ф. Анализ и оценка по геодезическим данным динамики оползней в условиях проведения взрывных работ и разгрузки склонов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4. – С. 19–24.

3. Topographic laser ranging and scanning: principles and processing // Edited by Shan J., Toth K. – 2nd edition. – CRC Press, 2018. – 654 p.
4. Баборыкин М. Ю., Жидиляева Е. В. Мониторинг оползней с использованием лазерного сканирования и геодезических наблюдений // Инженерные изыскания. – 2014. – № 3. – С. 16–24.
5. Овсяченко Н. И., Акопов Д. Н. Лазерное сканирование и мониторинг оползневых склонов // Инженерные изыскания. – 2012. – № 2. – С. 40–45.
6. Кузин А. А., Санникова А. П. Методика оценки оползневой опасности при освоении территорий на основе геоинформационных систем по геодезическим данным // Геодезия и картография. – 2016. – № 4. – С. 43–50.
7. Кожоголов К. Ч., Нифадьев В. И., Усманов С. Ф. Прогнозирование устойчивости откосов и склонов на основе численного моделирования напряженно-деформированного состояния горных пород // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2017. – Т.4, № 3. – С. 54–59.
8. Карпик А. П., Хорошилов В. С., Комиссаров А. В. Анализ методов и средств изучения динамики перемещений оползневых склонов // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 6. – С. 17–32. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-6-17-32.
9. Павловская О. Г., Хорошилов В. С., Носков М. Ф. Методика выделения однородных оползневых зон по результатам геодезических наблюдений вертикальных перемещений осадочных реперов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 5. – С. 31–34.
10. Ключин Е. Б., Михелев Д. Ш., Барков Д. П. и др. Практикум по прикладной геодезии. Геодезическое обеспечение строительства и эксплуатации инженерных сооружений. – М. : Недра, 1993. – 368 с.
11. Khoroshilov V. S. Mathematical Modelling of Sayano-Shushenskaya Dam Displacement Process after 2009 Accident // International Journal of Engineering Research in Africa. – 2018. – Vol. 39. – P. 47–59. – DOI 10.4028/www.scientific.net/JERA.39.47.
12. Khoroshilov V. S., Kobeleva N. N., Noskov M. F. Analysis of possibilities to use predictive mathematical models for studying the dam deformation state // Journal of Applied and Computational Mechanics. – 2022. – Vol. 8, No. 2. – P.733–744. – DOI 10.22055/JACM.2022.38005.3129.
13. Дж. Бокс, Г. Дженкинс. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. – М. : Мир. – 1974. – Кн. 1. – 405 с.
14. Г. Дженкинс, Д. Ваттс. Спектральный анализ и его приложения / пер. с англ. В. Ф. Писаренко. – М. : Мир, 1971. – 317 с.

### Об авторах

*Валерий Степанович Хорошилов* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры космической и физической геодезии.

*Ольга Геннадьевна Павловская* – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики.

*Наталья Николаевна Кобелева* – кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии.

*Харьес Каюмович Ямбаев* – доктор технических наук, профессор.

Получено 16.11.2022

© В. С. Хорошилов, О. Г. Павловская, Н. Н. Кобелева, Х. К. Ямбаев, 2023

## Mathematical modeling of the displacements dynamics of landslide slopes under the conditions of technogenic impacts

*V. S. Khoroshilov<sup>1</sup>, O. G. Pavlovskaya<sup>1\*</sup>, N. N. Kobeleva<sup>1</sup>, Kh. K. Yambaev<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation

\* e-mail: pavlovskaya@ssga.ru

**Abstract.** The article discusses the features of mathematical modeling of the stress-strain state of landslide slopes to predict their movements. Regular control and monitoring of exogenous geological processes are important elements of a qualitative assessment of landslide events, including both the timely identification of

areas with the greatest danger and the elimination of their consequences. The natural and technogenic features of the study area are considered. The previous results of the processing of geodetic observation data are presented, which are the basis for mathematical modeling of the stress-strain state of landslide slopes and for predicting their movements. Based on the Fourier transform, a spectral study of the vertical displacements of landslide signs was carried out and an analysis of the obtained spectrograms was made. Modeling of movements of landslide slopes subject to technogenic impacts (blasting and removal of a large amount of soil) is implemented on the basis of a forecast dynamic model. The model is presented in a recurrent form in the form of the first two conditional moment functions, which made it possible to predict the movements of controlled landslide slopes with a sufficiently high accuracy.

**Keywords:** landslide slope, geodetic observations, centered displacement components, Fourier transformation, spectrograms of displacements, mathematical modeling, forecast model

## REFERENCES

1. Simonyan, V. V. (2011). *Izuchenie opolznevykh protsessov geodezicheskimi metodami [Study of landslide processes by geodetic methods]*. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering Publ., 172 p. [in Russian].
2. Khoroshilov, V. S., Pavlovskaya, O. G., & Noskov, M. F. (2013). Analysis and assessment by geodetic data of landslide dynamics in conditions of blasting and slope unloading. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 4, 19–24 [in Russian].
3. Shan, J., & Toth, K. (Eds.). (2018). *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing* (2nd ed.). CRC Press, 654 p.
4. Baborykin, M. Y., & Zhidilyaeva, E. B. (2014). Landslide monitoring using laser scanning and geodetic observations. *Inzhenernye izyskaniia [Engineering Surveys]*, 3, 16–24 [in Russian].
5. Ovsuchenko, N. I., & Akopov, D. N. (2012). Laser scanning and monitoring of landslide slopes. *Inzhenernye izyskaniia [Engineering Surveys]*, 2, 40–45 [in Russian].
6. Kuzin, A. A., & Sannikova, A. P. (2016). Estimation method of landslide hazard developing territories based on GIS using geodetic data. *Geodeziia i kartografiia [Geodesy and Cartography]*, 4, 43–50 [in Russian].
7. Kozhogulov, K. Ch., Nifadyev, V. I., & Usmanov, S. F. (2017). Forecasting the stability of slopes and slopes based on numerical modeling of the stress-strain state of rocks. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk [Fundamental and Applied Issues of Mining]*, 4(3), 54–59 [in Russian].
8. Karpik, A. P., Khoroshilov, V. S., & Komissarov, A. V. (2021). Analysis of methods and tools for studying the dynamics of displacement of landslides. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 26(6), 17–32. doi: 10.33764/2411-1759-2021-26-6-17-32 [in Russian].
9. Pavlovskaya, O. G., Khoroshilov, V. S., & Noskov, M. F. (2012). Method of allocation of homogeneous landslide zones based on the results of geodetic observations of vertical movements of sedimentary reference points. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 5, 31–34 [in Russian].
10. Clumy, Or. B., Mikhelev, D. G., Barkov, D. P., & et al. (1993). *Praktikum po prikladnoi geodezii. Geodezicheskoe obespechenie stroitel'stva i ekspluatatsii inzhenernykh sooruzhenii [Practicum on applied geodesy. Geodesic support for construction and operation of engineering structures]*. Moscow: Nedra Publ., 368 p. [in Russian].
11. Khoroshilov, V. S. (2018). Mathematical Modelling of Sayano-Shushenskaya Dam Displacement Process after 2009 Accident. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 39, 47–59. doi: 10.4028/www.scientific.net/JERA.39.47.
12. Khoroshilov, V. S., Kobeleva, N. N., & Noskov M. F. (2022). Analysis of possibilities to use predictive mathematical models for studying the dam deformation state. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 8(2), 733–744. doi: 10.22055/JACM.2022.38005.3129.
13. Box, J., & Jenkins, G. (1974). *Analiz vremennykh riadov. Prognoz i upravlenie: Kn. 1 [Time series analysis. Forecast and management: Book 1]*. Moscow: Mir Publ., 405 p. [in Russian].
14. Jenkins, G., & Watts, D. (1971). *Spektral'nyi analiz i ego prilozheniia [Spectral analysis and its applications]*. V. F. Pisarenko (Trans.). Moscow: Mir Publ., 317 p. [in Russian].

**Author details**

*Valery S. Khoroshilov* – D. Sc., Professor, Department of Space and Physical Geodesy.

*Olga G. Pavlovskaya* – Ph. D., Associate Professor, Department of Higher Mathematics.

*Natalia N. Kobeleva* – Ph. D., Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy.

*Kharies K. Yambaev* – D. Sc., Professor.

Received 16.11.2022

© *V. S. Khoroshilov, O. G. Pavlovskaya, N. N. Kobeleva, Kh. K. Yambaev, 2023*