

А. А. Кузин¹, В. Г. Филиппов^{1}*

Геодезическое обеспечение мониторинга оползней

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

* e-mail: s225015@stud.spmi.ru

Аннотация. Комплексный подход к изучению оползневых склонов предполагает проведение инженерно-геологических и гидрогеологических изысканий, по результатам которых выполняется математическое моделирование оползня. Геодезический метод существенно дополняет результаты моделирования и позволяет уточнить механизмы протекания оползневой деформации. В статье рассмотрены вопросы геодезического обеспечения мониторинга оползней: оценка стабильности опорных реперов по пространственным координатам, наблюдение рабочих реперов наблюдательной станции технологией спутникового позиционирования Real-Time Kinematic (RTK), наблюдение линейно-угловыми измерениями недоступных для прямой видимости рабочих реперов наблюдательной станции, а также прогнозирование смещений оползня на основе полученных геодезических данных о пространственных положениях реперов. Применение предлагаемой методики позволит получать более полные сведения о протекании оползневых процессов, что позволит повысить качество наблюдений за оползнеопасными процессами геодезическими методами.

Ключевые слова: оползневые деформации, геодезические методы, мониторинг

A. A. Kuzin^{1}, V. G. Filippov¹*

Geodetic supply for landslide monitoring

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

* e-mail: kuzin_aa@pers.spmi.ru

Abstract. An integrated approach to the study of landslide slopes involves engineering-geological and hydrogeological surveys, the results of which are used to perform mathematical modelling of the landslide. The geodetic method significantly complements the results of modelling and allows clarifying the mechanisms of landslide deformation. The article deals with the issues of geodetic supply of landslide monitoring: assessment of stability of reference benchmarks by spatial coordinates, observation of working benchmarks of the observation station by Real-Time Kinematic (RTK) satellite positioning technology, observation by linear-angular measurements of inaccessible for line-of-sight working benchmarks of the observation station, as well as prediction of landslide displacements on the basis of obtained geodetic data on spatial positions of benchmarks. Application of the proposed methodology will allow obtaining more complete information about the landslide processes, which will improve the quality of observations of landslide hazardous processes by geodetic methods.

Keywords: landslide deformations, geodetic methods, monitoring

Введение

Наблюдение за оползнями является актуальной задачей: количество чрезвычайных происшествий имеет тенденцию на увеличение [1] и регионы России, особенно южные, не являются исключением [2]. Оползни природного характера [3–5], причиной которых наиболее часто становятся дождевые осадки [6, 7] для предотвращения последствий, требуют точного и корректного прогнозирования [8], например, при помощи методов моделирования [9, 10]. В настоящее время активно применяются методы геотехнического анализа, геомеханические расчеты, предполагающие определение вероятных смещений оползня, а также расчета зоны его влияния. В рамках комплексного подхода к изучению оползней применяются геодезические методы, среди которых можно выделить методы фотограмметрии [11], воздушно-лазерное сканирование [12, 13], технологию спутникового позиционирования в режиме реального времени Real-Time Kinematic (RTK) [14], способы сетевого решения которой становятся предметом последних исследований [15, 16]. Данный метод имеет особый интерес ввиду того, что ГНСС-оборудование становится доступнее для потребителя [17–19], в то же время являясь источником подробной информации о пространственных положениях наблюдаемых реперов при небольших трудозатратах.

Исследование посвящено разработке методики по комплексному наблюдению за оползнеопасными процессами геодезическими методами, преимущественно спутниковыми методами позиционирования. Актуальность исследования обусловлена необходимостью адаптации имеющихся и разработке новых методик по наблюдениям оползней с целью приведения их в соответствие современным геодезическим методам и приборам.

Методы и материалы

В статье предлагается выполнение геодезических работ по наблюдению оползнеопасных процессов комплексной методикой в несколько этапов (рис. 1).

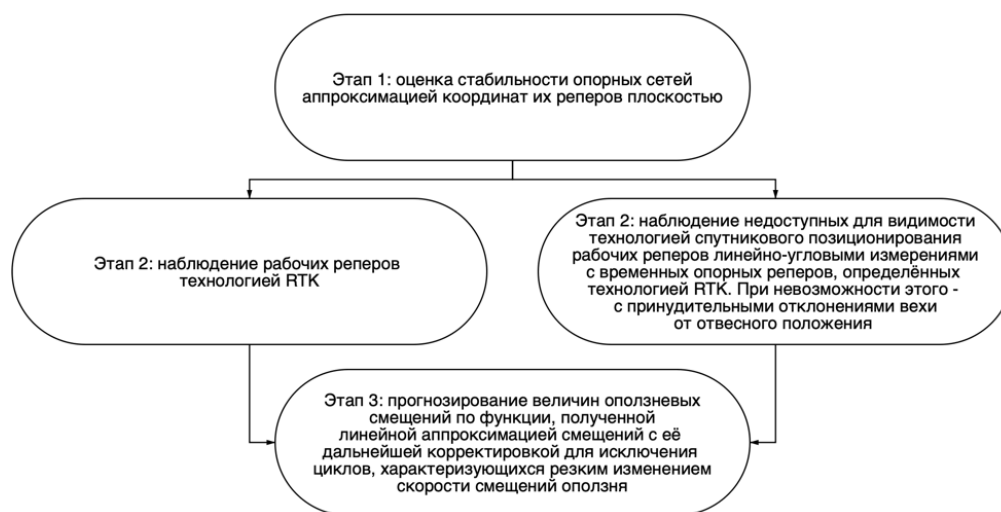


Рис. 1. Комплексная методика наблюдения за оползнеопасными процессами геодезическими методами

Первый этап предполагает оценку стабильности опорных сетей, состоящих из опорных реперов, закрепляемых вне зоны влияния оползня. Нормативные документы, регулирующие процессы наблюдения за оползнями (СП 420.1325800.2018 «Инженерные изыскания для строительства в районах развития оползневых процессов. Общие требования» (СП 420)), а также нормативные документы, регулирующие процессы наблюдения за деформациями в целом (ГОСТ 24846–2019 «Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений») отмечают необходимость проведения работ по оценке стабильности опорных реперов, так как от их неподвижности в течение длительного периода времени напрямую зависит качество наблюдений рабочих реперов наблюдательной станции, преемственность измерений между циклами, и, как следствие, правильная интерпретация процесса смещений.

Предлагается оценивать стабильность опорных сетей путем аппроксимации пространственных координат реперов плоскостью, с целью дальнейшего анализа характерных элементов плоскости: ее центра, нормали к плоскости, а также точки на нормали к плоскости.

По наличию либо отсутствию смещений характерных элементов плоскости предлагается делать вывод о наличии, либо об отсутствии смещений любого количества опорных реперов наблюдательной станции, а также проводить анализ стабильности реперов в пространстве: путем применения данного метода предполагается анализ наличия как вертикальных, так и горизонтальных смещений опорных реперов сети.

Следующий этап методики предполагает определение координат рабочих реперов наблюдательной станции технологией RTK.

При наблюдениях за оползнеопасными процессами остаются открытыми вопросы необходимых условий и параметров наблюдений: количество эпох наблюдений, интервал времени между фиксируемыми эпохами, допустимая величина «dilution of precision» (DOP), минимально допустимое количество видимых спутников, количество используемых ГНСС-систем, максимально допустимое удаление ровера от базовой станции, а также необходимый режим измерения – от одиночной базовой станции, либо сетевой режим. В то же время, оползневой склон может обладать густой растительностью, при которой кроны деревьев будут служить помехой в случае наблюдений спутниковыми методами позиционирования. В таком случае, возможно закрепление ряда временных опорных реперов, определение их пространственного положения технологией RTK, а наблюдение за рабочими реперами наблюдательной станции выполнять с любого удобного для видимости положения методами линейно-угловых измерений, например, с применением электронного тахеометра.

Другим вариантом решения проблемы может быть наблюдение рабочих реперов с установкой тахеометра непосредственно над опорным репером, но в таком случае не всегда возможно обеспечить видимость между опорным и рабочим репером, так как проектирование опорных реперов может осуществляться с целью спутниковых наблюдений, в которых необходимость в наличии прямой видимости между опорными и рабочими реперами отсутствует.

Предлагается решение проблемы наблюдением рабочих реперов по следующей схеме: определение пространственного положения рабочего репера возможно осуществить путем линейно-угловых измерений с опорного репера на вежу с отражателем, установленную на рабочем репере, при ее принудительном отклонении от отвесного положения. Вежу с отражателем устанавливают острием на деформационный пункт, отклоняют от отвесного положения на максимально возможную величину (порядка 45°), после чего выполняют наблюдения на отражатель. Вежу поворачивают приблизительно на 120° вокруг деформационного пункта при том же наклоне, после чего выполняют второе наблюдение. Затем вежу снова поворачивают вокруг пункта на 120° при том же наклоне, выполняют третье наблюдение. Далее, вежу наклоняют на меньшую величину относительно отвесного положения (порядка 10°) и выполняют четвертое наблюдение. Полученные пространственные координаты узловой точки отражателя при наклонах вежи (минимум 4 положения) будут описывать поверхность сферы, а аппроксимация полученных координат сферой при этом позволит определить ее центр, который, в свою очередь, геометрически будет совпадать с положением рабочего репера наблюдательной станции [20]. Наименьшие погрешности могут быть достигнуты при использовании призматических отражателей с постоянной -18 мм или -40 мм, так как их конструкция предполагает отсутствие погрешностей за смещение узловой точки.

Завершающим этапом методики является прогнозирование оползневых смещений по полученным в предшествующих прогнозу циклах наблюдений. Предлагается метод прогноза, в котором выполняется построение временного ряда смещений, линейная аппроксимация имеющихся величин смещений, а также дальнейшая корректировка полученной в ходе линейной аппроксимации функции с целью уточнения прогноза. Корректировка заключается в исключении из временного ряда циклов, предшествующих резкому изменению скорости. Дальнейшая аппроксимация выполняется по циклам, в которых скорость смещений оползня была постоянной в пределах допустимых значений, определяемых величиной средней квадратической погрешности изменения скорости смещений оползня.

Предлагаемый метод корректировки прогноза позволит избежать неточностей прогноза, связанных с резкими изменениями скорости смещений оползня, к которым уязвим прогноз методом линейной аппроксимации и тем самым повысить точность прогноза оползневых смещений.

Результаты

Оценка стабильности опорной сети выполнялась на примере наблюдений пунктов сети постоянно действующих базовых станций «Геоспайдер». Была выполнена оценка стабильности четырёх пунктов: BLNS, BNTA, GU29 и ORLV за период с 21.06.2019 г. по 11.04.2022 г. по данным 8 циклов наблюдений. Была подтверждена стабильность пунктов сети отсутствием смещений характерных элементов полученных в ходе аппроксимаций плоскостей.

Ряд проведенных в ходе исследования экспериментов показывает, что при спутниковых наблюдениях на каждом рабочем репере технологией RTK с количеством эпох не менее 120, что соответствует сеансу продолжительностью 2 минуты при частоте измерений 1 Гц и удалении от одиночной базовой станции не более чем на 2 км в случае использования ГНСС-приёмника с точностью определения положения в плане не хуже $5 \text{ мм} + 0,5 \text{ мм/км}$, по высоте не хуже $10 \text{ мм} + 0,8 \text{ мм/км}$ возможно достичь необходимой точности наблюдений согласно СП 420.

Применение метода определения положения пунктов линейно-угловыми измерениями с временно закреплённых опорных реперов также доказал свою применимость при аналогичных параметрах.

Способ определения положения рабочего репера при принудительных наклонах вехи в ходе лабораторных и полевых экспериментов доказал свою применимость: при наблюдениях в лабораторных условиях при расстояниях 8,7, 13,9, 21,3 м удалось достичь погрешностей определения положений реперов, не превышающих 0,6, 1,0 и 4,8 мм соответственно. В полевых условиях на расстояниях 9,3, 29,5, 54,7 м значения погрешностей составили 3,3 м, 4,4, 4,5 мм соответственно, что доказывает возможность применения данного способа наблюдений рабочих реперов.

Использование метода отбраковки части данных при прогнозировании величин смещений оползня путем линейной аппроксимации величин смещений оползня позволило, в ряде случаев, повысить точность прогноза горизонтальных смещений оползня на 27 %, вертикальных смещений оползня на 34 %, в среднем на 5 % для горизонтальных и вертикальных смещений оползня по сравнению с прогнозированием функцией линейной аппроксимации без ее корректировки.

Обсуждение

Применение данной методики позволяет повысить качество наблюдений оползнеопасных склонов геодезическими методами. Рассмотренная методика отличается от имеющихся полным спектром работ по исследованию и изучению оползнеопасных процессов, а также позволяет оценивать горизонтальные и вертикальные смещения реперов наблюдательной станции, что расширяет область знаний о протекаемом процессе.

Заключение

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Методика предполагает 3 этапа наблюдений: оценку стабильности опорной сети, определение положения рабочих реперов наблюдательной станции одним из трех вариантов: технологией RTK, линейно-угловыми измерениями с временных опорных реперов, либо с опорных реперов при наклонном положении вехи с отражателем на рабочем репере в случае отсутствия видимости, а также прогнозирование величин оползневых смещений на предстоящие этапы наблюдений.

2. Применение предлагаемой методики комплексного наблюдения за оползнеопасными процессами геодезическими методами позволяет анализировать протекание процесса в полной мере, что способствует более качественному наблюдению за оползневыми смещениями.

3. Путем проведения экспериментов были получены результаты, позволяющие утверждать, что предлагаемые методы способствуют повышению точности наблюдений положений реперов, а также повышению точности прогноза оползневых смещений.

Благодарности

Авторы выражают благодарность всем, кто вносил корректировки, предложения по улучшению качества материалов статьи по ходу ее подготовки. Также авторы выражают благодарность кафедре инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за предоставленную возможность в проведении исследования. Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за их ценные комментарии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Osipov, V. I., Romyantseva, N. A & Eremina, O. N. (2019). Living with risk of natural disasters. *Russian Journal of Earth Sciences*, 19(6), 1–10. DOI 10.2205/2019ES000673.
2. Разумов В. В., Богданов М. И., Богданова Н. Д., Разумова Н. В., Гусейнова Н. О. Оценка масштабов распространения и опасности активизации оползневых процессов в Дагестане // Юг России: экология, развитие. – 2019. – Т. 14, № 4. – С. 56–77. – DOI: 10.18470/1992-1098-2019- 4-56-77.
3. Wistuba, M., Malik, I., Gorczyca, E. & Ślęzak, A. (2021). Establishing regimes of landslide activity – Analysis of landslide triggers over the previous seven decades (Western Carpathians, Poland). *CATENA*, 196, 104888. DOI 10.1016/j.catena.2020.104888.
4. Pospehov, G. B., Savón, Y., Delgado, R., Castellanos, E. A. & Peña, A. (2023). Inventory Of Landslides Triggered By Hurricane Matthews In Guantánamo, Cuba. *GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY*, 16(1), 55–63. DOI 10.24057/2071-9388-2022-133.
5. Поспехов Г. Б., Савон Ю., Мосейкин В. В. Определение зон оползневой опасности методом анализа иерархий на примере провинции Гуантанамо // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 1. – С. 125–145. – DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_125.
6. Fustos, I., Abarca-del-Río, R., Mardones, M., González, L. & Araya, L. R. (2020). Rainfall-induced landslide identification using numerical modelling: A southern Chile case. *Journal of South American Earth Sciences*, 101, 102587. DOI 10.1016/j.jsames.2020.102587.
7. Kumar Thakur, M., Desamsetti, S., Rajesh, A. N., Rao, K. K., Narayanan, M. S. & Kumar, T. V. (2020). Exploring the rainfall data from satellites to monitor rainfall induced landslides – A case study. *Advances in Space Research*, 66(4), 887–894. DOI 10.1016/j.asr.2020.05.015.
8. Intrieri, E., Carlà, T. & Gigli, G. (2019). Forecasting the time of failure of landslides at slope-scale: A literature review. *Earth-Science Reviews*, 193, 333–349. DOI 10.1016/j.earscirev.2019.03.019.
9. Глазунов В. В., Бурлуцкий С. Б., Шувалова Р. А., Жданов С. В. Повышение достоверности 3D-моделирования оползневого склона на основе учета данных инженерной геофизики // Записки Горного института. – 2022. – Т. 257. – С. 771–782. – DOI: 10.31897/PMI.2022.86.
10. Халкечев Р. К., Халкечев К. В. Применение теории катастроф для математического моделирования оползневого процесса на вогнутых склонах горных территорий // Устойчивое

развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15, № 3. – С. 720–726. – DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-720-726.

11. Яицкая Н. А., Бригида В. С., Гаврина О. А., Копылов А. С. Фотограмметрическая оценка деформационных процессов на оползневых склонах при обеспечении устойчивого развития территорий Кавказа // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15, № 3. – С. 558–567. – DOI 10.21177/1998-4502-2023-15-3-558-567.

12. Друзь Р. А., Протасова А. В., Охунов Ш. Р., Кшановская А. В. Сравнительная оценка воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 5. – С. 130–141. – DOI 10.25018/0236_1493_2023_5_0_130.

13. Мустафин М. Г., Кологривко А. А., Васильев Б. Ю. Анализ точности построения цифровых моделей рельефа на основе данных периодического воздушного лазерного сканирования горнопромышленного объекта // Горный журнал. – 2023. – № 2. – С. 56–62. – DOI 10.17580/gzh.2023.02.09.

14. Елагин А. В., Зайцев М. В., Прохоров Д. А., Шендрик Н. К. Оценка точности определения координат спутниковыми приемниками EFT M3 GNSS и EFT M4 GNSS в режиме RTK // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 26–33. – DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-3-26-33.

15. Wang, P., Liu, H., Nie, G., Yang, Z., Wu, J., Qian, C. & Shu, B. (2022). Performance evaluation of a real-time high-precision landslide displacement detection algorithm based on GNSS virtual reference station technology. *Measurement*, 199, 111457. DOI 10.1016/j.measurement.2022.111457.

16. Gümüş, K. & Selbesoğlu, M. (2019). Evaluation of NRTK GNSS positioning methods for displacement detection by a newly designed displacement monitoring system. *Measurement*, 142, 131–137. DOI 10.1016/j.measurement.2019.04.041.

17. Magalhães Valente, D. S., Momin, A., Grift, T. & Hansen, A. (2020). Accuracy and precision evaluation of two low-cost RTK global navigation satellite systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 168, 105142. DOI 10.1016/j.compag.2019.105142.

18. Benoit, L., Briole, P., Martin, O., Thom, C., Malet, J. P. & Ulrich, P. (2015). Monitoring landslide displacements with the Geocube wireless network of low-cost GPS, 195, 111–121. DOI 10.1016/j.enggeo.2015.05.020.

19. Garrido-Carretero, M. S., de Lacy-Pérez de los Cobos, M. C., Borque-Arancón, M. J., Ruiz-Armenteros, A. M., Moreno-Guerrero, R. & Gil-Cruz, A. J. (2019). Low-cost GNSS receiver in RTK positioning under the standard ISO-17123-8: A feasible option in geomatics. *Measurement*, 137, 168–178. DOI 10.1016/j.measurement.2019.01.045.

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024610546 Российская Федерация. Программа оценки стабильности геодезических сетей по пространственным координатам : № 2023689408 : заявл. 27.12.2023 : опубл. 11.01.2024 / А. А. Кузин, В. Г. Филиппов ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – EDN TKWWUS

© А. А. Кузин, В. Г. Филиппов, 2024