



УДК 528.4:528.021.78

Комплексное применение технологии ГИС и наземного лазерного сканирования для исследования оползневых тел (на примере оползня в Октябрьском ущелье города Саратова)



В. А. Данилов, А. В. Федоров, В. А. Морозова

Данилов Владимир Анатольевич, кандидат географических наук, доцент, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, kohavi@yandex.ru

Федоров Алексей Васильевич, старший преподаватель, заведующий учебной лабораторией геоинформатики и тематического картографирования, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, alexeivf@gmail.com

Морозова Валерия Андреевна, ассистент, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, riukarin@gmail.com

В настоящее время метод лазерного сканирования все чаще применяется для фиксации последствий техногенных аварий и природных бедствий. В то же время мировая практика показала, что данные лазерного сканирования могут использоваться не только для инвентаризации и уточнения оценки состояния оползневых тел, но и для мониторинга и прогнозирования их развития. Авторы статьи предложили методику комплексного мониторинга оползневых тел, основанную на использовании технологий ГИС и наземного лазерного сканирования (НЛС), оценили достоинства и недостатки метода НЛС по разным критериям. Данная методика была апробирована на оползне левого борта Октябрьского ущелья города Саратова.

Ключевые слова: ГИС, лазерное сканирование, оползни, трехмерное моделирование, Саратов, Октябрьское ущелье.

Integrated Application of GIS Technology and Terrestrial Laser Scanning for the Investigation of Landslide Bodies (on the Example of a Landslide in the Oktyabrsky Gorge of the City of Saratov)

V. A. Danilov, A. V. Fedorov, V. A. Morozova

Vladimir A. Danilov, <https://orcid.org/0000-0002-6971-9860>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, kohavi@yandex.ru

Alexey V. Fedorov, <https://orcid.org/0000-0002-8999-6398>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, alexeivf@gmail.com

Valeriia A. Morozova, <https://orcid.org/0000-0002-0000-0000>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, riukarin@gmail.com

Currently the laser scanning method is increasingly used to record the effects of man-made accidents and natural disasters. At the same time, world practice and experience have shown that laser scan data

can be used not only to inventory and refine the state of landslide bodies, but also to monitor and predict their development. Using the example of a landslide of the left side of the Oktyabrsky gorge in the city of Saratov, the authors of the article proposed a method of integrated monitoring of landslide bodies using GIS technology and terrestrial laser scanning (TLS), assessed the advantages and disadvantages of the TLS method according to various criteria.

Key words: GIS, laser scanning, landslides, three-dimensional modeling, Saratov, Oktyabrsky gorge.

DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-3-160-167>

Введение

Предлагаемая методика комплексного применения технологий ГИС и наземного лазерного сканирования для исследования оползневых тел разработана с учетом работ, выполненных зарубежными и отечественными специалистами, а также на основе наших полевых исследований и опыта практического применения системы наземного лазерного сканирования.

Актуальность проблемы обуславливается в первую очередь тем, что последствия оползневых процессов могут представлять опасность как для человека, так и для объектов инфраструктуры города. Поэтому возникает необходимость оперативной разработки планов инженерной защиты объектов, а также проведения предварительных мероприятий, в том числе мониторинговых, для прогноза развития негативных оползневых процессов и их предотвращения или уменьшения последствий, что позволит снизить риски и уменьшить материальный ущерб.

Цель работы – оценить возможность комплексного использования методики наземного лазерного сканирования (НЛС) при изучении и мониторинге оползневых процессов с применением ГИС-технологий и построения разновременных поверхностей состояния рельефа.

Рельеф Саратовского Поволжья обусловлен главным образом его структурными особенностями и характером новейших тектонических движений земной коры. На территории города Саратова отмечаются в первую очередь такие геоморфологические процессы, как выветривание, смыв, размыв (эрозия), оползание, в меньшей степени проявлены дефляция, суффозионно-карстовые и другие геологические процессы [1, 2].

Оползневые процессы являются самыми распространенными и в то же время наиболее сложными, длительными и многофакторными. В



настоящее время в связи с интенсивным освоением городом склоновых территорий основным и наиболее опасным водно-гравитационным процессом становится именно оползание [3].

На территории города Саратова оползневые процессы в основном приурочены к береговой зоне уступами плато и склонами овражно-балочной сети (рис. 1).

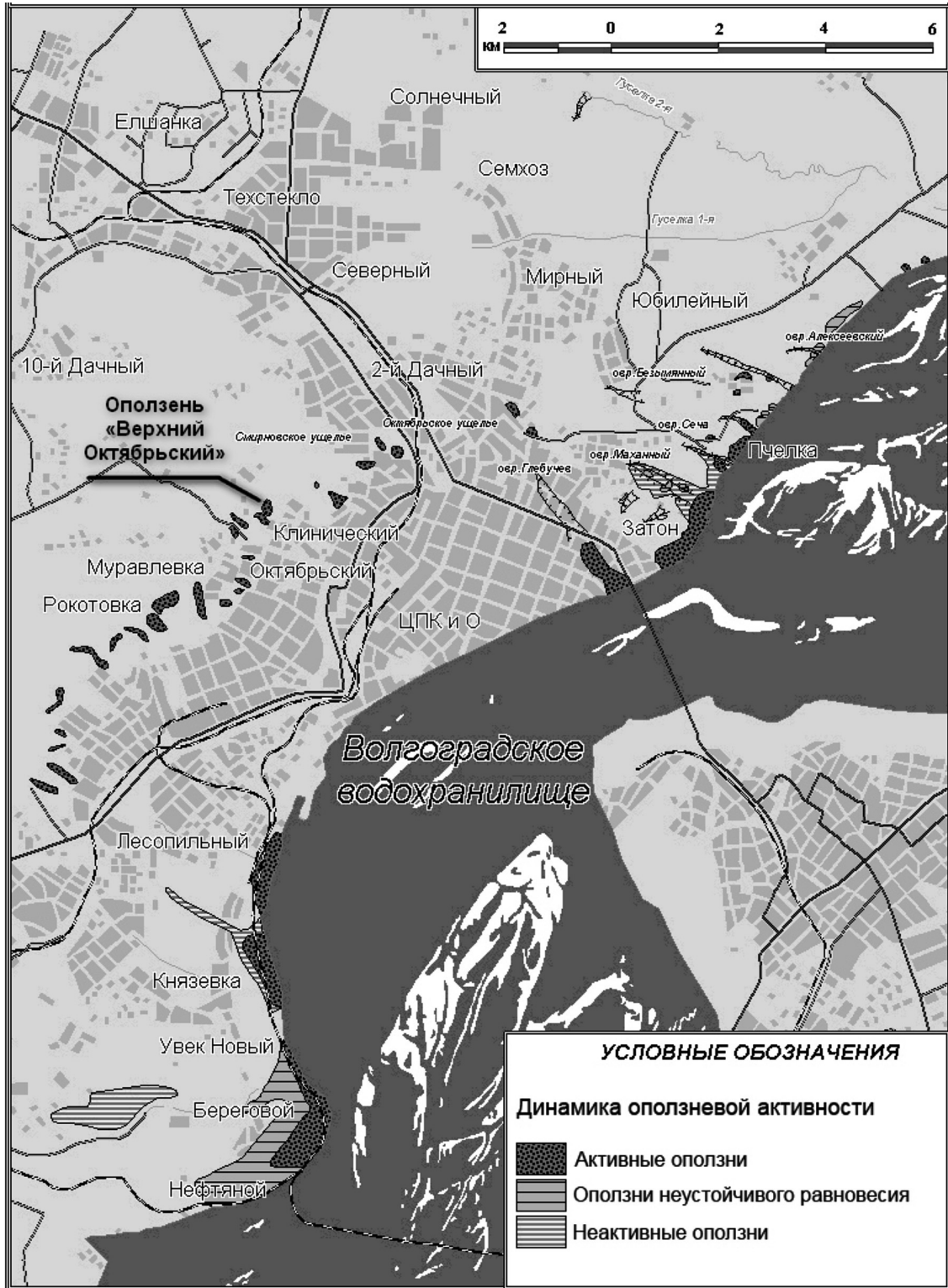


Рис. 1. Активность оползней на территории города Саратова (сост. авт. по: [4–5])



Оползни береговой зоны. На территории Саратова, оползни данной группы связаны с близостью Волгоградского водохранилища. Это зона классического развития оползневой оползневой процесс. Одним из основных причин современного развития оползней здесь являются подмыв и разрушение берегового склона поверхностными водами р. Волги, а так же антропогенные факторы – в основном застройка склонов и переувлажнение грунтов в результате неконтролируемого полива участков.

Оползни, приуроченные к уступам плато. Данная группа оползней приурочена к склонам Соколовгородского массива и денудационному уступу Лысогорского плато. Такие оползни в основном являются полигенными, на них оказывают влияние как природные, так и антропогенные факторы.

Оползни, приуроченные к элементам овражно-балочной сети. Оползни данной группы образуются за счет подмыва бортов оврага. Этому способствуют антропогенная деятельность и выход на поверхность грунтовых вод.

Проявление экзогенных процессов, их интенсивность и направленность на территории города Саратова главным образом зависят от таких факторов, как физико-географические условия (геолого-тектонические, гидрогеологические, геоморфологические, метеорологические), в частности от климато-ландшафтных особенностей территории, а в последнее время еще и от активной антропогенной деятельности (табл. 1).

В совокупности на территории Саратова можно выделить следующие доминирующие факторы, влияющие на процессы развития и активизации древних и современных оползней: геоморфологические, гидрометеорологические, метеорологические и антропогенные (табл. 2).

В настоящее время острой необходимостью являются выявление и оценка территорий в черте города Саратова, подверженных риску и угрозе активизации оползневых процессов, а также проведение на них предварительных комплексных противооползневых мероприятий. Все это требует наличия современных объективных данных по существующим и потенциальным оползневой территориям.

При изучении оползней используются разные методы полевых и камеральных исследований, которые подразумевают создание картографических моделей опасных оползневых участков. При этом учитываются геологическое строение оползневой участка, рельеф склона, его морфометрические свойства, гидрогеологические и климатические условия, а также другая необходимая информация. Накопленную в процессе изысканий научно-техническую информацию о состоянии оползневой склона целесообразно представить в единой ГИС-среде с целью автоматизации и повышения эффективности работы [6].

Картографическая основа и наполнение модели оползневых территорий могут быть выполнены разными методами: с помощью тра-

Таблица 1

Классификация оползней на территории г. Саратова

<i>По географическому положению</i>		
Приурочены к береговой зоне водохранилища	Приурочены к уступу Лысогорского плато	Приурочены к овражно-балочной сети
Оползни на участках Пчелка, Новопчелка, Затон, Зоналка, Князевка, Увек, 1-я Гуселка	Оползни Октябрьского и Смирновского ущелий, подножия Лысой горы, на участке Областной психиатрической больницы	Оползни оврагов Алексеевский, Безымянный, Маханный, Сеча, Глебучев
<i>По возрасту</i>		
Древние	Современные	
Оползни Октябрьского, Смирновского ущелий, на участках Областной психиатрической больницы, Увек, Затон, оврага Глебучев	Оползни Октябрьского, Смирновского ущелий, на участках Областной психиатрической больницы, Пчелка, Новопчелка, 1-я Гуселка, Увек, ул. Сиреновой	
<i>По активности</i>		
Активные	Неактивные	
Оползни Октябрьского, Смирновского ущелий, на участках Областной психиатрической больницы, Затон, Пчелка, Новопчелка, Зоналка, Увек (Нефтяной), 1-я Гуселка, ул. Сиреновой, оврагов Безымянный, Алексеевский, Глебучев	Оползни оврага Сеча, правого борта оврага Алексеевский, на участке Князевка, Лесопильный	
<i>По мощности (объему задействованных пород)</i>		
Малые	Средние	Очень крупные
Оползни оврагов Маханный, Безымянный, Алексеевский, Глебучев, на участках Пчелка, Новопчелка, ул. Сиреновой, Октябрьского ущелья	Оползни на участках Областной психиатрической больницы, 1-я Гуселка	Оползни на участках Затон, Увек, Смирновского ущелья

Примечание. Сост. по: [4–5].



Таблица 2

Факторы, способствующие развитию оползневых процессов

Факторы	Описание	Пример на территории города Саратова
Геоморфологические	Неустойчивость склона, чередование водоупорного и водоносного горизонтов горных пород, воздействие эрозионных процессов, наличие трещиноватых пород, наличие в толще грунта размягченных глин и плавящихся песков	Оползни на склонах Соколовогорского и Лысогорского массивов. Оползень оврагов Алексеевский, Безымянный, оползень Октябрьского ущелья и Увекского массива
Гидрогеологические	Малая глубина залегания первого от поверхности водоносного горизонта, фильтрационные свойства пород и их водопроницаемость, характер движения грунтовых вод, выходы подземных вод на поверхность	Оползень на участке Зоналка, оползень оврага Алексеевский, Новопчелкинский оползень, оползень оврага Безымянный, оползень Октябрьского ущелья, оползни Увекского массива
Метеорологические	Обильные осадки и их распределение по сезонам, интенсивное снеготаяние (максимальное насыщение грунтов водой), перепад температур, глубина сезонного промерзания	Новопчелкинский оползень, оползень оврага Безымянный, оползни Увекского массива
Антропогенные	Хозяйственная деятельность человека (вырубка растительности на склонах, подрезка склонов, искусственное подтопление, освоение оползневых террас и прирочных участков коренного склона под дачно-коттеджное строительство, неумеренный полив)	Оползень оврага Алексеевский, оползень Маханного оврага, оползень Смирновского ущелья, оползень Октябрьского ущелья, оползни Увекского массива

Примечание. Сост. по: [6].

диционных геодезических работ (тахеометрическая съемка, нивелирование и др.), глобальной навигационной спутниковой системы съемки, воздушного и наземного лазерного сканирования (ВЛС и НЛС), а также фотограмметрических методов – аэро- и космосъемки, по данным с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Выбор метода зависит от характеристик оползневого процесса – размера оползневого тела, скорости оползания, величины минимального смещения, которое необходимо зарегистрировать, а также от наличия и возможности использования того или иного оборудования.

Наблюдения за смещением земляных масс могут выполняться осевыми методами (смещение точек относительно оси), плановыми, вертикальными или пространственными для определения полного смещения точки в пространстве [7]. Пространственные методы позволяют объективнее оценить смещения на территории оползня и определить его характеристики.

Наиболее передовым пространственным методом является НЛС. В результате съемки получается плотное облако точек с трехмерными координатами, на основе которого в среде ГИС создается актуальная поверхность рельефа.

НЛС применяется для высокоточных наблюдений за небольшими оползнями и обладает следующими преимуществами:

- высокой производительностью, которая позволяет значительно сократить время полевых измерений, при этом автоматизация измерений облегчает работу оператора с прибором;
- высокой точностью измерений, которая позволяет определять детальность исследования;
- наглядной трехмерной визуализацией полученных результатов, которая является готовой цифровой моделью рельефа (ЦМР);

- возможностью создания фотографической панорамы местности и совмещения ее с результатами сканирования.

Первый мировой опыт применения технологии наземного лазерного сканирования для построения модели рельефа с целью исследования оползней относится к началу XXI в. Так, рядом авторов [8] уже отмечалось, что наземное лазерное сканирование позволяет построить подробную модель оползневой поверхности, а с помощью одновременного сканирования, когда получены две или более модели с привязкой, может быть вычислен объем смещенных пород.

Обработка данных одновременного сканирования является сложной задачей, поскольку для получения объективной картины необходимо учитывать многие факторы, влияющие на качество получаемого результата. Среди них можно выделить группы факторов, влияющих на точность моделей оползней, построенных по результатам наземного лазерного сканирования, и их достоверность. К ним относят:

- климатические, связанные с естественными природными ограничениями или состоянием атмосферы, земной поверхности в момент съемки;
- технологические, связанные со спецификой применяемого оборудования и точностью его измерения;
- методологические, связанные с обоснованием и выбором модели определения точек поверхности в едином «облаке» точек;
- математические, связанные с выбором способов интерполяции модели поверхности и их взаимным сравнением.

Отдельно следует остановиться на выявленных недостатках технологии наземного лазерного сканирования:



– сильной ограниченности съемки при наличии высокой и густой растительности или других объектов;

– трудоемкости ручной обработки массива данных;

– необходимости установки небольшого шага сканирования для соблюдения точностных параметров и предотвращения разрывов в «облаке» точек.

На современном этапе наземное лазерное сканирование все чаще начинают сравнивать с традиционными и современными технологиями исследования оползневых тел, фотограмметрией (наземной или воздушной), воздушной лазерной или радарной радиолокационной съемкой [9–12].

По производительности и пространственному охвату наземное лазерное сканирование значительно уступает воздушным методам, но, как правило, оно обеспечивает большую точность и детальность результатов за счет возможности выбора точки обзора и времени сканирования, а также адекватного представления форм рельефа со значительной вертикальной составляющей [9, 10].

Наземное лазерное сканирование целесообразно использовать в том случае, когда применение других геодезических приемов и приборов для получения геометрических характеристик оползней затруднено или невозможно.

При исследовании оползней требуется учитывать их природные и антропогенные особенности, а также технические возможности сканирующих систем, которые предполагают выбор разных видов наземной лазерной съемки.

Конкретные методы исследования оползневых тел зависят от их типа и характера расположения на склоне. Выделяются оползни с преимущественно горизонтальными, с вертикальными движениями, а также сочетающие или чередующие те или другие.

По характеру расположения на склоне выделяют оползни, занимающие весь склон, расположенные в подошвенной приводораздельной и в средней части склона.

Методика исследования оползневых тел с помощью технологии лазерного сканирования опирается на анализ геометрических параметров полученной поверхности рельефа, построение серии продольных и поперечных профилей, а также определение зон сноса и аккумуляции с их характеристиками, получаемыми на основе разности моделей поверхности на разные даты [13–14].

Другой метод исследования оползней заключается в изучении не самих оползневых поверхностей, а только геометрии отдельных «маркеров», например крупных камней, валунов или даже хозяйственных объектов, элементов жилых домов [8, 13]. С помощью данного метода анализируются геометрические и угловые характеристики полученных трехмерных моделей объектов за разное время, на основании чего делается вывод об их перемещении и изменении углов, а следовательно, и поверхности под ними.

Предлагаемая методика исследования оползневых тел городских территорий с применением технологий наземной лазерной съемки и обработки результатов опирается на мировой опыт [15], но имеет отличия, обусловленные спецификой территории, характером застройки, режимом использования и региональными особенностями.

Отличительные особенности заключаются:

– в плотной застройке территории, фактически уменьшающей видимость и скрывающей поверхность рельефа;

– ограниченности физического доступа, особенно на участках под частной индивидуальной застройкой или землепользованием, например дачах;

– ограниченности или полном запрете применения летательных средств воздушной разведки или съемки;

– отсутствию склонов, что особенно касается приволжских оползней, откуда возможно осуществить съемку.

Все это предполагает, что исследование подобных территорий может быть осуществлено следующими методами наземной лазерной съемки:

– сплошной съемкой – возможна только для оползней, расположенных в верхних частях склонов, где в качестве реперных точек могут использоваться искусственные объекты, находящиеся на водоразделе, например линии ЛЭП, радиомачты, капитальные строения. Лазерное сканирование на таких участках следует начинать снизу вверх с отвязкой от предыдущей станции и контролем привязки по серии ранее определенных или установленных реперов;

– профильной съемкой – возможна для оползневых тел со значительной линейной протяженностью и плотной застройкой, где профиль прокладывается по открытым общедоступным участкам (дорогам, землеотводам коммуникаций и пр.). Лазерное сканирование на таких участках требуется выполнять по замкнутым ходам с обязательной детальной съемкой окружающих капитальных строений и сооружений – последние могут выступать «маркерами», отражающими через геометрические параметры состояние поверхности;

– локальной съемкой – возможна для любых открытых участков оползневых тел, выполняется в местах наиболее активного проявления денудационных и аккумуляционных процессов.

Выбор определенного метода лазерной съемки в первую очередь обусловлен конечными целями исследования оползневого тела, во-вторую – объемом известных сведений о нем. Если территория ранее не исследовалась, а также отсутствуют гидрогеологические данные, целесообразно проводить сплошную наземную лазерную съемку.

Как правило, активные оползневые тела регулярно исследуются, что предполагает на-



личие разных данных о них, в том числе картографических. В этом случае профильная съемка оползня оказывается менее затратной по времени и ресурсам, более того, она будет обеспечивать получение необходимых данных для геодинамического мониторинга. Она также осуществляется при физической невозможности выполнения сплошной съемки, например в прибрежных зонах, которые не позволяют установить сканер в точках, обеспечивающих требуемый обзор.

Локальная съемка применяется в тех случаях, когда требуется детальное исследование отдельного участка или организация оперативного мониторинга характера активности оползневого тела.

Процесс обработки полученных данных состоит из четырех этапов.

1. Первичная обработка данных в программном комплексе Leica Cyclone 9.1.3 – была проведена их регистрация, сшивка результатов отдельных измерений, итогом которых стало «облако точек» – модель оползня, представленная в виде набора точек, описанных в трехмерном пространстве, содержащая значение величины отражения.

2. Фильтрация и очистка «облака точек». В «облаке точек» представлены все объекты реальной местности, поэтому на данном шаге отфильтровываются точки с ошибочными или незначительными показателями отражательной способности, осуществляется «очистка» модели от объектов, не характеризующих рельеф. К таким объектам относятся растительность, сооружения, постройки и прочие «артефакты».

3. Восстановление поверхности рельефа. На данном этапе очищенное «облако точек» импортируется в программный комплекс, позволяющий его загружать, обрабатывать и на его основе строить модель поверхности, типа AutoCad Map 3d с установленным модулем CloudWorx. С помощью вручную определяемых параметров «скользящего окна» по алгоритму ICP из исходного «облака точек» выделяются только отметки, которые характеризуют земную поверхность, остальные объекты, в основном растительность, отфильтровываются. На основе полученных отметок высот строится математическая TIN-модель поверхности оползневого тела.

4. Анализ и сравнение. На данном этапе непосредственно в ГИС выполняются построение, сравнение и анализ полученных моделей поверхностей, строятся профили по произвольным направлениям, осуществляется их сравнение с данными, полученными из картографических или других источников, рассчитываются емкостные модели разницы поверхностей, раскрывающие зоны денудации и аккумуляции, строятся линии профилей и вычисляется объем перемещенного грунта.

Оползень расположен на левом борту Октябрьского ущелья в районе родника вдоль ул. Шелковичная, соединяющей город с санаторием «Октябрьское ущелье» (см. рис. 1). Активи-

зация оползневого процесса 23 мая 2004 г. была вызвана в первую очередь техногенным фактором, а именно неграмотным освоением территории под индивидуальную застройку. Площадь современного оползня составляет порядка 25 тыс. м², а общий объем смещенных пород оценивается в 250 тыс. м³ при протяженности более 200 м, глубине захвата 12,0–13,5 м.

На рассмотренном оползневом участке в рамках мониторинга была выполнена местная локальная съемка наиболее активного участка – стенки отрыва и ее бровки, верхней оползневой террасы и нижележащей стенки отрыва в 2017, 2018 и 2019 гг. Для выявления долговременных гемодинамических подвижек результаты съемки сравнивались с лазерным сканированием этой территории, выполненным в июне 2012 г. [13]. Контрольными реперными точками являлись расположенные рядом металлические опоры ЛЭП 35 кВт.

Полученные результаты

Территориальный орган Центра государственного мониторинга состояния недр и региональных работ в Саратовской области отмечает за 2018 г. активизацию 7 оползневых тел, из которых только один оползень «Сиреневый» находится на уступе Лысогорского массива [16].

Мониторинговые исследования на территории оползня левого борта Октябрьского ущелья города Саратова с применением НЛС показали следующее:

- на протяжении последних 7 лет оползень продолжает активно развиваться, оседают и разрушаются главная бровка и уступ оползня;

- величина оседания оползня с 2012 по 2017 г. местами достигла 1,7 м при среднем значении 40–50 см на главной бровке (рис. 2), в 2017 и 2018 гг. скорость замедлилась до 10 см/год, а в 2019 г. увеличилась до 15–20 см/год;

- весной 2019 г. ниже главной бровки образовалась новая вторичная стенка отрыва во всю длину оползневого тела, которая привела к вертикальному проседанию средней части оползня и составила от 5 до 12 см;

- «глубина» разрушения главной бровки с 2012 г. местами составила 10 м при среднем значении до 2,0 м;

- объем смещенных пород с апреля 2017 г. по апрель 2018 г. на площади 1,4 га составил 1940 м³, и в основном он пришелся на главный уступ, складки и валы средней части оползня. Объем пород, «вынесенных» за пределы границы съемки дефляционными, эрозионными и гравитационными процессами за этот же период составил 998 м³;

- в связи с интенсификацией неблагоприятных погодных условий в 2018–2019 гг. средняя величина вертикального смещения на том же участке составила 5–7 см, что оценивается в 840–1060 м³ смещенного грунта.

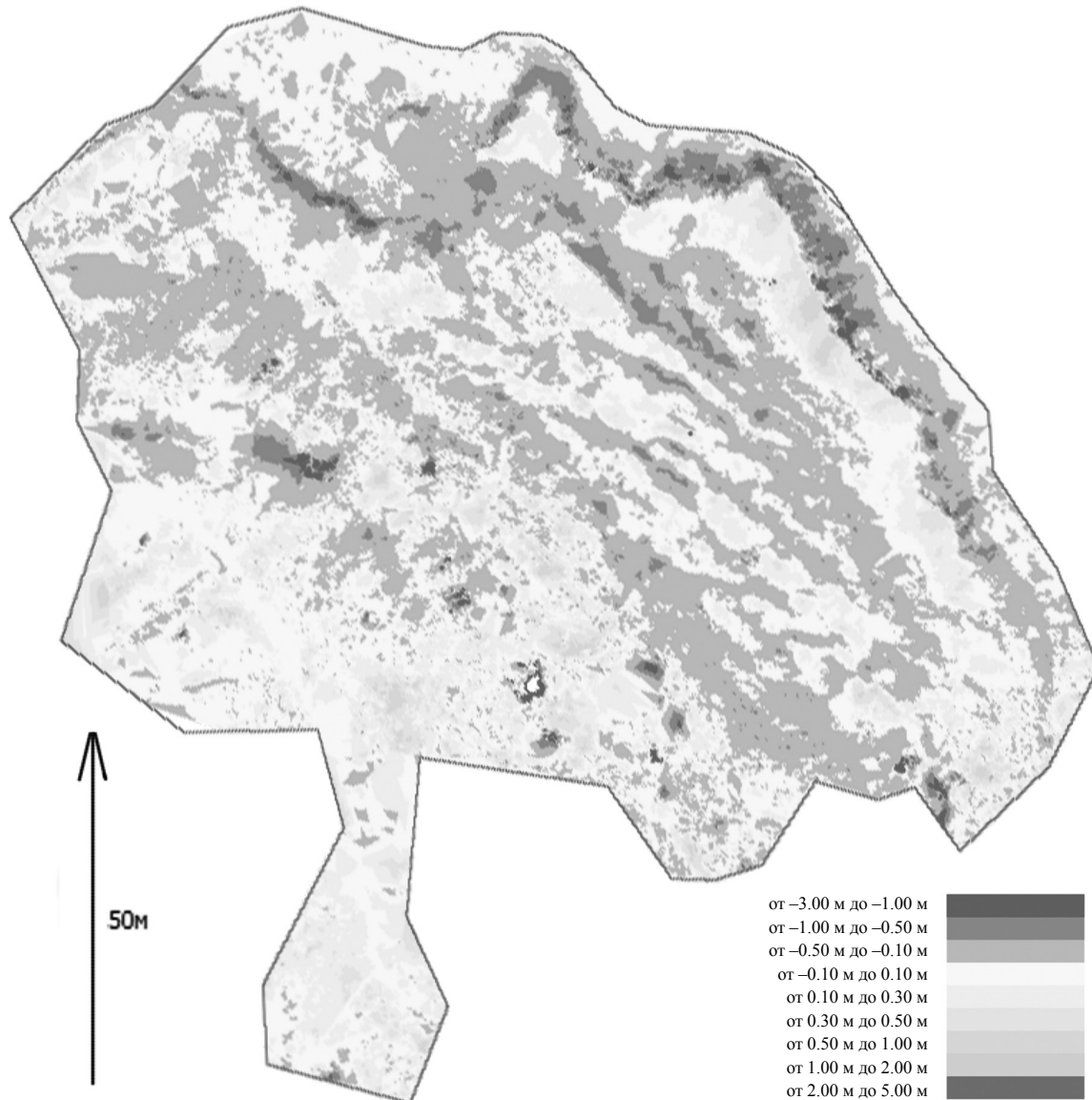


Рис. 2. Разница поверхностей на июнь 2012 г. и октябрь 2017 г. на локальном участке оползня «Верхний Октябрьский» в г. Саратове

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. В дальнейшем в рамках мониторинга целесообразно проводить ранневесенние съемки, которые предоставляют наиболее качественные результаты наземного лазерного сканирования с минимальным влиянием растительности на качество построения цифровой модели рельефа оползня и профилей.

2. Для быстрой фиксации и построения состояния поверхности рельефа в осеннее время требуется дополнение алгоритма ИСР автоматической фильтрацией «растительности» на основе функционала ГИС по данным разноинтервальной съемки и яркостным значениям отраженного сигнала.

3. На профилях, полученных по НЛС, легко читаются линии отрыва оползневого вала и

ступени оползня. Этих данных достаточно для специалистов при наличии гидрогеологических данных для оценки состояния склона оползня и выявления его дальнейшего развития.

Основываясь на полученных результатах, можно констатировать, что технологии ГИС и НЛС имеют преимущества перед традиционными (картографическими) методами исследования оползневых тел. Следовательно, данный подход является перспективным при исследовании разных экзодинамических процессов и может с успехом дополнить или даже заменить серию разновременных карт.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РГО-РФФИ (договор № 12/2019/РГО-РФФИ от 24 апреля 2019 г.).



Библиографический список

1. Лотоцкий Г. И. Современное рельефообразование в Саратовском Поволжье : метод. пособие. Саратов : Издательство Саратовского университета, 2013. 26 с.
2. Токарский О. Г., Токарский А. О. Инженерно-геологические условия г. Саратова : учеб. пособие. Саратов : Издательство Саратовского университета, 2009. 102 с.
3. Макаров В. З. Ландшафтно-экологический анализ крупного промышленного города. Саратов : Издательство Саратовского университета, 2001. 178 с.
4. Квитка В. В. Информационный отчет. Стационарное изучение экзогенных геологических процессов на территории Саратовской области в 1993–96 гг. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rfgf.ru/catalog/docview.php?did=c19ac06de0f668e515668636c0215977> (дата обращения: 01.06.2019).
5. Кузьмин В. В., Тимофеева Е. А., Чуносков Д. В. Оценка риска для территории г. Саратова вследствие проявления оползневых процессов // Вестник СГАУ им. Н. И. Вавилова. 2010. № 2. С. 80.
6. Кузин А. А., Примаченко Е. И. Картографическое моделирование оползнеопасных зон с использованием ГИС-технологий // Природные опасности : связь науки и практики : сб. трудов конф. / Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва. Саранск, 2015. С. 226–229.
7. Коротков В. З., Мравец Д. А. Геодезические методы изучения динамики оползней Южного берега Крыма // Строительство и техногенная безопасность / КФУ им. В. И. Вернадского. Симферополь, 2011. Вып. 36. С. 92–106.
8. Teza G., Galgaro A., Zaltron N., Genevois R. Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields : a new approach [Электронный ресурс] // International Journal of Remote Sensing. 2007. Vol. 28, №16. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/01431160601024234> (дата обращения: 01.06.2019).
9. Brede B., Lau A., Bartholomeus H. M., Kooistra L. Comparing RIEGL RiCOPTER UAV LiDAR Derived Canopy Height and DBH with Terrestrial LiDAR. 2017 [Электронный ресурс]. URL: https://www.riegl.com/uploads/tx_pxprriegl-downloads/Comparing_RiCOPTERUAVData_TLSDa-ta_BenjaminBrede_UniWageningen.compressed.pdf (дата обращения: 01.06.2019).
10. Gruszczynski W., Matwij W., Ćwiakala P. Comparison of low-altitude UAV photogrammetry with terrestrial laser scanning as data-source methods for terrain covered in low vegetation. 2017 [Электронный ресурс]. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2018/10/e3sconf_polviet2018_03002.pdf (дата обращения: 01.06.2019).
11. Данилов В. А., Федоров А. В., Безвершенко Л. С. Сравнение методов фотограмметрии и лазерного сканирования для создания трехмерных моделей объектов и территорий археологических ГИС (на примере археологического раскопа Увекского городища) // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2019. Т. 19, вып. 2. С. 72–78. DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-2-72-78>
12. Данилов В. А., Лащевцева Т. А., Хворостухин Д. П. Наземная лазерная съемка и ее сравнение с картографическим и стереофотограмметрическим способами получения данных для построения цифровых моделей рельефа и расчета морфометрических показателей // Геоморфология и картография : материалы XXXIII пленума Геоморфологической комиссии РАН. Саратов : Издательство Саратовского университета, 2013. С. 295–300.
13. Barbarella M., Fiani M., Lugli A. Landslide monitoring using multitemporal terrestrial laser scanning for ground displacement analysis // Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2015. Vol. 6, iss. 5–7. P. 398–418.
14. Guo X. T., Huang T. Rock-based Landslide Safety Monitoring Using Terrestrial Laser Scanning Technology // Lasers in Engineering. 2017. Vol. 37, iss. 1–3. P. 17–34.
15. Kordic B., Pribicevic B., Dapo A. Object Monitoring in Urban Landslide Areas Using Terrestrial Laser Scanning // 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM-2014. Sofia, 2014. Vol. 3, b. 2. P. 247–254.
16. Информационная сводка о проявлениях экзогенных геологических процессов на территории Российской Федерации за II квартал 2018 г. [Электронный ресурс]. URL: http://www.geomonitoring.ru/download/EGP/svodka/2018_II.pdf (дата обращения: 01.06.2019).

Образец для цитирования:

Данилов В. А., Федоров А. В., Морозова В. А. Комплексное применение технологии ГИС и наземного лазерного сканирования для исследования оползневых тел (на примере оползня в Октябрьском ущелье города Саратова) // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2019. Т. 19, вып. 3. С. 160–167. DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-3-160-167>

Cite this article as:

Danilov V. A., Fedorov A. V., Morozova V. A. Integrated Application of GIS Technology and Terrestrial Laser Scanning for the Investigation of Landslide Bodies (on the Example of a Landslide in the Oktyabrsky Gorge of the City of Saratov). *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Earth Sciences*, 2019, vol. 19, iss. 3, pp. 160–167 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-3-160-167>