

УДК 551.4.02:551.435.6(235.34)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЭРОФОТОСЪЕМКИ И ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДИНАМИКИ ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ КАК БАЗЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ© 2020 г. М. В. Архипова¹, А. С. Викторов¹, Т. В. Орлов^{1,*},
А. И. Казеев¹, В. Н. Капралова¹, О. Н. Трапезникова¹¹ Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН, Москва, Россия

*E-mail: tim.orlov@gmail.com

Поступила в редакцию 24.11.2016 г.

После доработки 12.12.2018 г.

Принята к публикации 08.10.2019 г.

Для участка трубопровода с активным развитием экзогенных геологических процессов (ЭГП) – оползней, эрозии и термокарста – определена их динамика на основе повторного лазерного сканирования. Участки развития ЭГП выявлены по материалам аэрофотосъемки и полевых работ. Проведено сравнение лазерного сканирования 2010 и 2011 гг. Определены изменения рельефа и объемы смещения грунтовых масс в результате развития ЭГП в полосе строительства трубопровода. Наиболее значительными являются изменения рельефа в пределах оползневого участка, также большие изменения отмечаются на участках прямых техногенных воздействий. Менее сильные изменения фиксируются в зонах сноса и накопления материала на оползневом участке; на участках развития эрозионных процессов и по периферии очагов термокарста отмечены понижения отметок высот. Было выявлено смещение материала с понижением высотных отметок в размере 3827 м³ и с повышением высотных отметок – 1890 м³.

Ключевые слова: опасные геологические процессы, лазерное сканирование, динамика, трубопроводы

DOI: 10.31857/S0435428120010034

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной горнодобывающей отрасли требует строительства транспортных сооружений, таких как авто- и железные дороги, нефте- и газопроводы. Линейные сооружения имеют значительную длину и часто пересекают участки со сложными инженерно-геологическими условиями. Для прогнозирования опасности и риска поражения экзогенными геологическими процессами (ЭГП) протяженных линейных сооружений на удаленных участках требуется найти метод быстрого и точного выявления динамики ЭГП [1].

Цель работы – оценить возможности использования воздушного лазерного сканирования (ВЛС) за разные периоды времени для анализа динамики ЭГП и определить особенности развития ЭГП (на примере строительства трубопроводов).

Проведение такой оценки основывается на двух съемках методом воздушного лазерного сканирования за 2010 и 2011 гг. вдоль трассы ВСТО (нефтепровод Восточная Сибирь–Тихий океан) при переходе через р. Чульмакан (2281-й км трассы нефтепровода ВСТО-1 от г. Тайшет (Иркутская область) в 15 км к северу от аэропорта г. Чульман, в 20 км на ССВ от г. Чульман).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- сравнение результатов первичного и повторного воздушного лазерного сканирования (ВЛС) за 2010 и 2011 гг.;
- создание карт изменения отметок земной поверхности на основе результатов сравнения разновременных ЦМР;
- определение динамики развития экзогенных геологических процессов;
- определение объема смещения грунтовых масс;
- оценка возможностей дальнейшего применения метода.

Воздушное лазерное сканирование и сопутствующая ему аэрофотосъемка активно развиваются и применяются в настоящее время для широкого круга геоморфологических и инженерно-геологических задач. Основные направления применения ВЛС [2] – изучение морфологии современного рельефа, его изменений, а также палеогеоморфологические реконструкции. Существенным преимуществом совместного использования аэрофотосъемки и лазерного сканирования является повышение точности интерпретации выявленных изменений рельефа [3]. Предлагаемый в работе подход базируется на современных методах анализа и обработки пространственных данных, развиваемых многими исследователями (напр. [4, 5]). В настоящее время накоплен значительный опыт применения воздушного лазерного сканирования для анализа оползней [4–12], эрозионно-аккумулятивных [13–16] и карстовых процессов [17], эолового рельефа [18]. Существенным вопросом, также затронутым в нашей работе, является вопрос точности ВЛС, в том числе, в зависимости от количества точек класса “земля” [19, 20]. Безусловно, ВЛС находит свое применение в научно-практической плоскости для работ по проектированию сложных инженерных объектов [21], но часто результаты оказываются неопубликованными.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследований выбран участок прохождения трассы магистрального нефтепровода (МН) “Восточная Сибирь – Тихий Океан” (ВСТО-1) в месте перехода через р. Чульмакан (рис. 1, а). Правобережный склон долины р. Чульмакан [22] сложен с поверхности элювиально-делювиальными отложениями (щебнистыми грунтами), подстилаемыми среднеюрскими песчаниками. Отложения находятся в многолетнемерзлом состоянии. Склоновые делювиальные отложения (мощностью до 1–3 м, редко больше) преимущественно представлены дресвяно-щебнистыми и песчано-супесчаными образованиями, элювиальные породы – щебнисто-глыбовой толщей разрушенных песчаников и алевролитов (рис. 1, б).

На исследуемом участке среди экзогенных процессов выделены криогенные, эрозионные и склоновые. В данном регионе доминируют блоковые оползни [23]. Оползни-блоки обычно образуются на крутых и средней крутизны склонах речных долин, сложенных переслаивающейся толщей песчаников, аргиллитов и алевролитов, нередко с угольными пластами.

Основной механизм развития оползневого процесса на рассматриваемом участке – это глубокие подвижки в виде пачек (блоков) скальных пород, представленных песчаниками юрского возраста, мерзлыми, трещиноватыми. Трещины зияющие, местами с дресвяно-щебнистым заполнителем. Смещение относительно монолитных блоков происходит вследствие раздавливания грунтов горизонта, залегающего в основании склона, предположительно на уровне уреза р. Чульмакан (с учетом талика под руслом). Рассматриваемый механизм развития оползневых деформаций на склоне соответствует типу глубоких блоковых оползней сжатия-выдавливания [24], именуемых также оползнями “ангарского” типа (рис. 1) [25].

Высота рассматриваемого склона достигает 200 м. При удельном весе скальных пород 25 кН/м^3 , толщина мощностью 150–200 м создает давление в основании склона

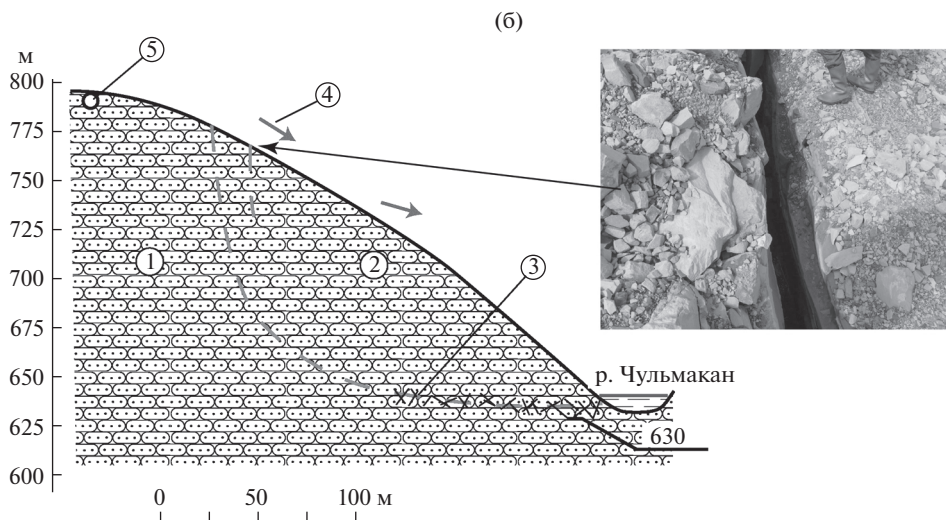
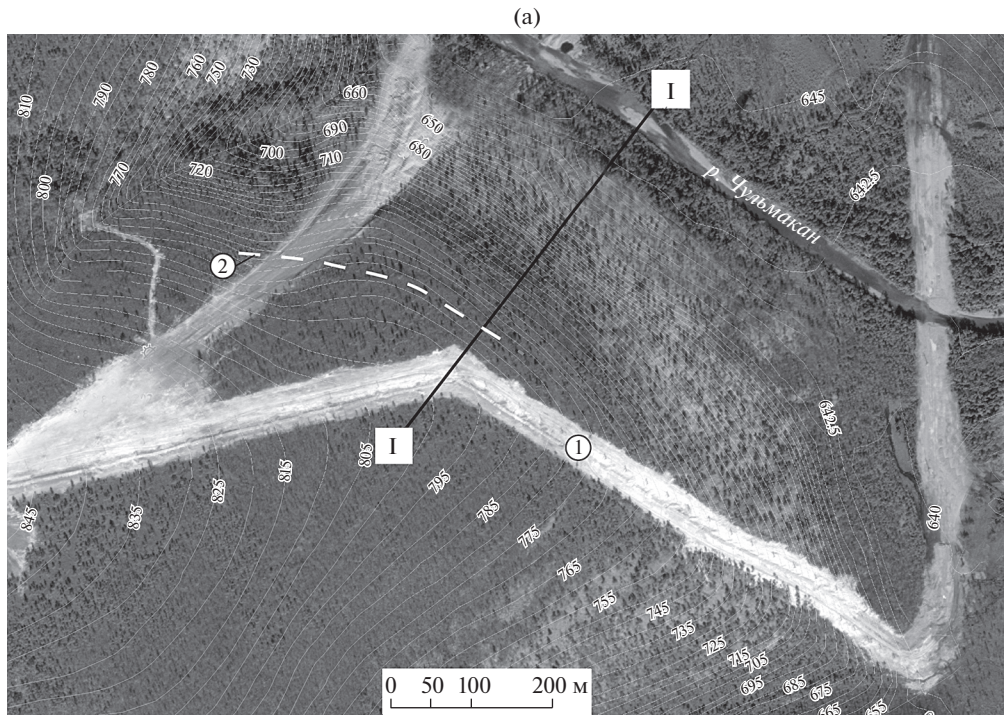
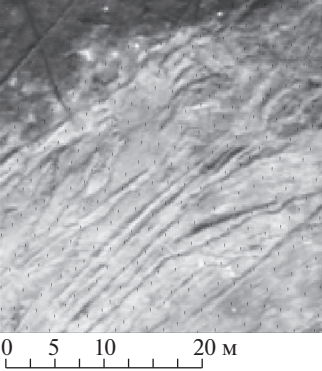
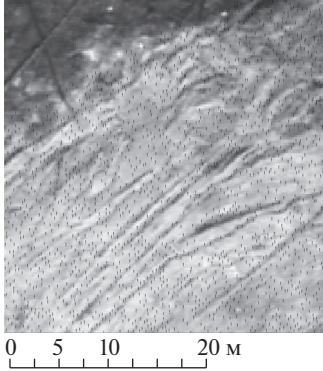


Рис. 1. Космоснимок исследуемого участка в месте перехода МН через р. Чульмакан (а): 1 – трасса магистрального нефтепровода, 2 – оползневая трещина (система трещин). (б) – схематический разрез по створу I–I – модель развития глубоких оползневых подвижек на оползневом участке Чульмакан: 1 – коренной массив (песчаники с прослоями алевролитов и аргиллитов), 2 – оползневой массив (деформированные пачки коренных пород), 3 – деформирующий горизонт со структурной прочностью грунтов $\sigma_{str} \ll 4500$ кПа, 4 – направление смещения, 5 – магистральный трубопровод.

Таблица 1. Технические характеристики лазерной съемки

Характеристика	2010	2011
Разрешение на местности	1 точка на 4 м ²	1 точка на 0.5 м ²
Точность измерения высот рельефа	Средняя ошибка 0.3 метра	Средняя ошибка 0.08 м
Общее количество использованных точек для построения ЦМР	60885	366961
Фильтрация (выделение точек класса “земля”)	нет	Да
Пример расположения точек лазерной съемки на исследованном участке (в качестве подложки использован аэрофотоснимок)		

3750–5000 кПа. Под таким давлением грунты слабых прослоев в толще скальных пород раздавливаются, вызывая отделение и перемещение пачек вышележащих пластов.

В пределах Алданского плато [23], где локализуется исследуемый участок, многолетнемерзлые породы имеют массивно-островной характер распространения и преимущественно развиты в пределах заболоченных днищ долин, а также на гольцовых возвышенностях. Долины рек и крупных ручьев в основном проморожены на глубину не более 100 м с наличием таликов под руслами.

Глубина сезонного протаивания на северных склонах изменяется от 0.5 до 1 м, на южных – от 1 до 2 м. Максимальное сезонное протаивание грунтов (3–5 м) отмечается на водоразделах и в верхних частях склонов, где среднегодовая температура мерзлых пород близка к 0°C. Со слоем сезонного промерзания (протаивания), его динамикой связано развитие пучения, наледеобразования, курумов. Курумовые поля распространены повсеместно на западном склоне рассматриваемого участка долины реки восточной и южной экспозиции. На восточном склоне курумы старые (заросшие мхом).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных данных были использованы результаты аэрофотосъемки (АФС), данные полевого обследования и материалы ВЛС. Аэрофотоснимки 2010 и 2011 гг. выступали в качестве вспомогательного материала и были использованы как база для интерпретации ЭГП. Характеристика полученных материалов ВЛС представлена в табл. 1.

Сравнение разновременных отметок высот проводилось в полосе трассы, лишенной растительности в ходе строительства. Именно на этой части анализ является наиболее актуальным, т.к. именно здесь находятся инженерные сооружения и в пределах этой полосы может происходить наиболее интенсивное смещение грунтовых масс (рис. 2).

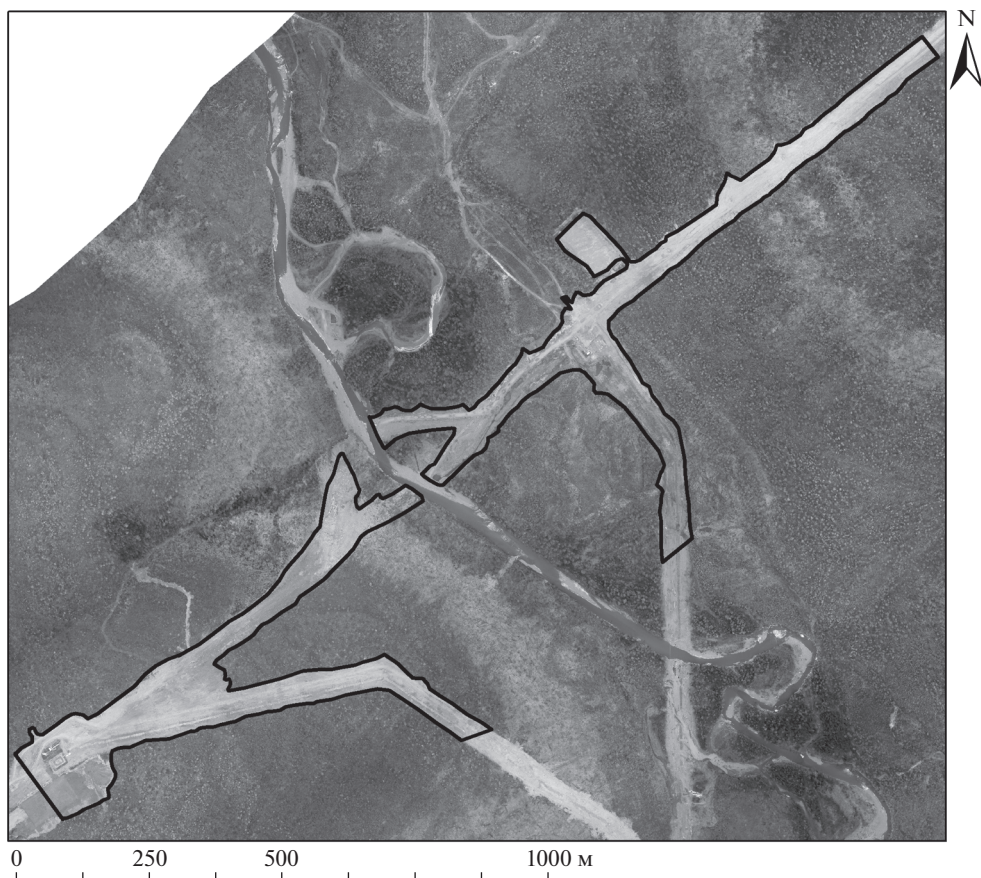


Рис. 2. АФС исследуемого участка. Черный контур – область изучения динамики ЭГП.

В работе были использованы программные комплексы SAGA 2.08 и ArcGIS 9.3. Последовательность работ включала следующие этапы.

1. Создание цифровой модели рельефа (ЦМР). Были созданы ЦМР для 2010 и 2011 гг. Модели создавались методом “inverse distance weighted” (IDW – метод обратновзвешенных расстояний) [26]. Разрешение ЦМР (0.5 м) было выбрано с учетом плотности исходных точек лазерных отражений для более плотной съемки 2011 г. Разрешение ЦМР по состоянию на 2010 г. было также приведено к разрешению ЦМР 2011 г. Обработка велась в программных комплексах SAGA и ArcGIS [27, 28]. Примеры ЦМР приведены на рис. 3.

2. Создание сетки разницы высот за один год. Сетка разницы высот создавалась в программном комплексе ArcGIS. Для характеристики изменений рельефа сетка была классифицирована на 7 градаций (рис. 4, а).

1. Сильное понижение поверхности – от -2.5 до -8 м;
2. Среднее понижение поверхности – от -1 до -2.5 м;
3. Слабое понижение поверхности – от -0.31 до -1 м;
4. Отсутствие изменений поверхности – от 0.31 до -0.31 м;
5. Слабое повышение поверхности – от 0.31 до 1 м;

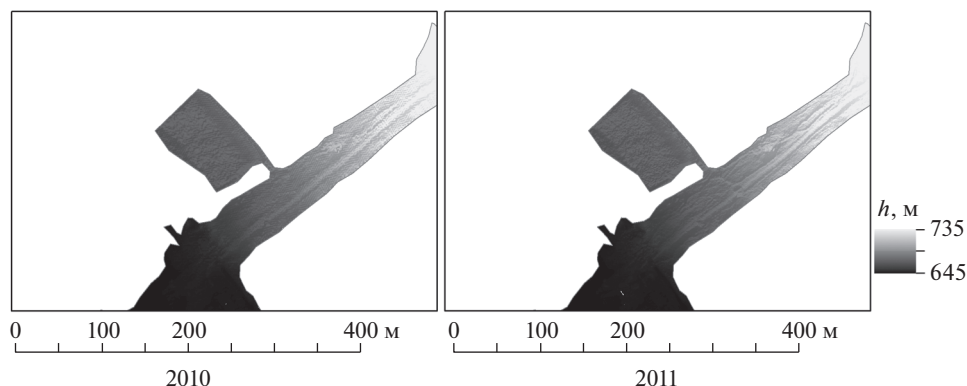


Рис. 3. Фрагменты цифровых моделей рельефа исследуемого участка на 2010 и 2011 гг.

6. Среднее повышение поверхности — от 1 до 1.5 м;

7. Сильное повышение поверхности — от 1.5 до 2.5 м.

Граничные значения градации “отсутствие изменений поверхности” (т.е. фактически полученные значения разницы высот — от 0.31 до -0.31 м) были приняты на основе оценки среднеквадратического отклонения разницы двух сеток. Остальные пороговые значения выбраны по перегибам гистограммы с помощью алгоритма Jenks’ Natural Breaks [29]. На основе классификации выделены участки изменения поверхности, относящиеся к каждой градации. Все участки со слабым, средним и сильным изменением поверхности отнесены к значимым и использовались в дальнейшем анализе.

3. Создание карты изменений высот (рис. 4, б) земной поверхности было осуществлено по следующему алгоритму:

- расчет разницы отметок между ЦМР за два временных среза;
- осреднение полученных данных с помощью окна 5×5 м;
- кластеризация полученных результатов.

Разница отметок между ЦМР за два временных среза считалась независимо от знака изменения (т.е. по модулю). Такой подход позволяет избежать эффекта компенсации сноса материала его накоплением. Таким образом были выделены области активного изменения.

Исходя из полученных расчетных результатов была предложена следующая классификация величин изменений:

- отсутствие изменения высоты поверхности (0–0.155 м);
- слабое изменение высоты поверхности (0.155–0.5 м);
- среднее изменение высоты поверхности (0.5–1 м);
- сильное изменение высоты поверхности (>1 м).

Также на основе разницы ЦМР составлена карта участков повышения и понижения поверхности. Карта составлена путем осреднения отдельно положительных и отрицательных значимых изменений поверхности для ячейки 5×5 м.

4. Интерпретация изменений высот с помощью АФС. В качестве дополнительных исходных данных для анализа динамики развития опасных экзогенных процессов и определения объема смещения грунтовых масс использованы материалы дешифрирования аэрофотоснимков за 2011 г. и полевые данные. Для решения этой задачи было сделано районирование участка в пределах трассы по преобладающим процессам,

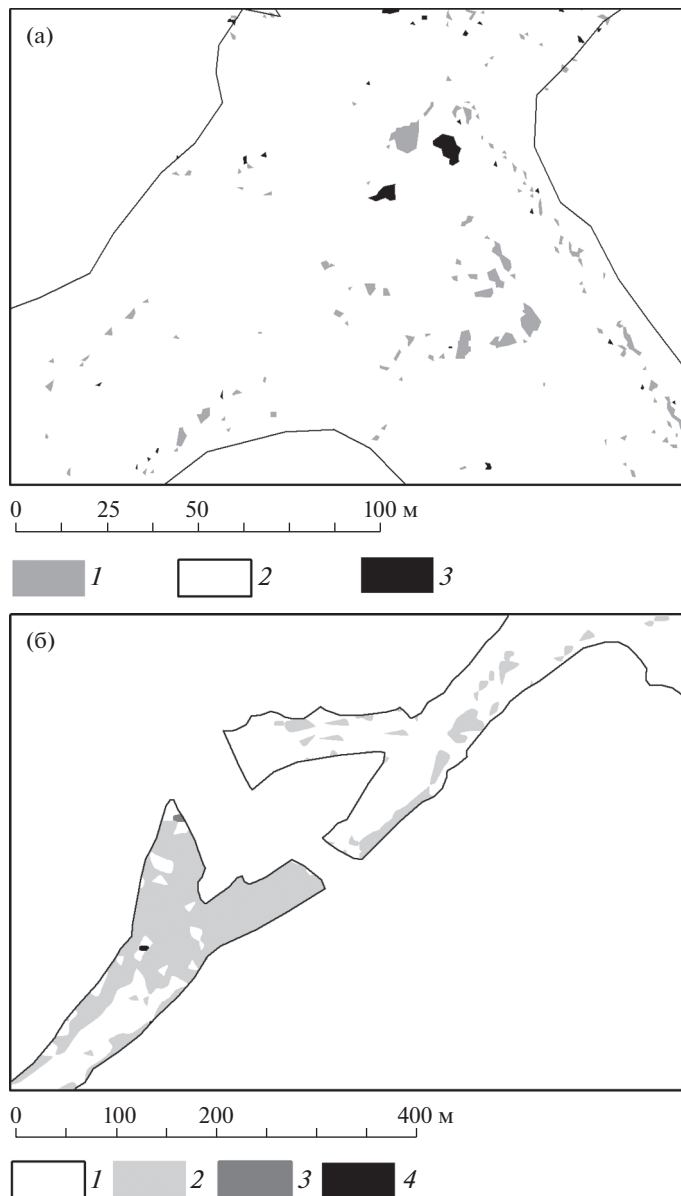


Рис. 4. Пример карт изменения рельефа.

(а) – фрагмент модели абс. значений разницы отметок высот за 1 год: 1 – понижение поверхности, 2 – изменения поверхности в пределах ошибки вычислений, 3 – повышение поверхности.

(б) – фрагмент карты изменения высот. *Изменение:* 1 – отсутствует, 2 – слабое, 3 – среднее, 4 – сильное.

обуславливающим изменение рельефа. Для каждого очага развития экзогенных геологических процессов вычислены величины изменения поверхности.

5. Оценка объема смещения грунтовых масс. Вычисление объема смещения грунтовых масс сделано для всей поверхности по участкам значимых изменений, а также для

Таблица 2. Площади, занятые участками со значимым изменением рельефа

Степень изменения рельефа	Средняя площадь участка, м ²	Суммарная площадь всех участков, м ²
Понижение поверхности: сильное	2.3	23.0
среднее	2.1	416.75
слабое	1.2	5930.5
Повышение поверхности: слабое	0.7	3135.5
среднее	0.5	129.25
сильное	1.6	43.5

очагов экзогенных геологических процессов. Вычисления проведены по следующей формуле:

$$V = S \times \Delta H,$$

где S – площадь значимого участка изменения поверхности, ΔH – среднее изменение высоты для данного участка.

Для очагов экзогенных геологических процессов проведено суммирование объемов изменений грунта для участков со значимыми изменениями по каждой градации.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

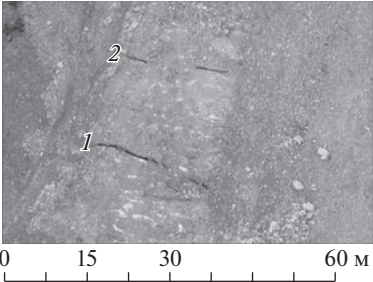
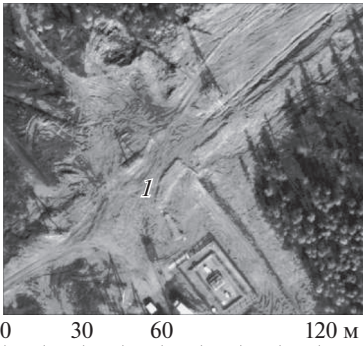

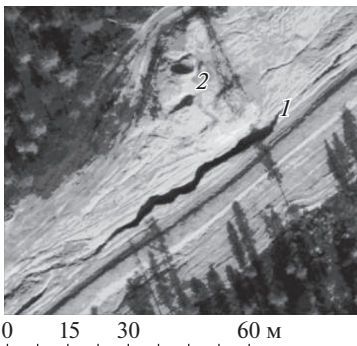
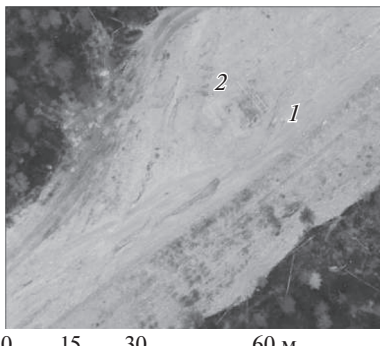
Как показывает анализ полученных материалов, для большей части исследуемой территории характерны слабые изменения рельефа (табл. 2). Доля участков со средними значениями изменения рельефа меньше в несколько раз, а количество участков с сильным изменением рельефа весьма незначительное.

Области, где рельеф изменился, приурочены к оползневому участку, местам развития эрозионных процессов, местам проявления процессов заболачивания и термокарста, а также связаны с инженерно-хозяйственной деятельностью. Области сильного и среднего изменения рельефа приурочены к участкам трещин на оползневом склоне (табл. 3) и участкам, связанным с инженерной деятельностью, в частности – к местам складирования грунта и планировки поверхности (табл. 3).

Динамика рельефа на оползневом участке. Общая площадь областей изменения рельефа в пределах оползневого участка составляет ≈ 2830 м². В пределах данной территории выделяются две зоны – в верхней части происходит преимущественно понижение высотных отметок, а в нижней части – преимущественно повышение высотных отметок (рис. 5). Указанные смещения грунта могут быть связаны с оползневыми движениями, а также отчасти с крипом. Наиболее сильные понижения образуются в местах развития трещин.

Динамика рельефа на участках развития эрозионных процессов. Величины изменений рельефа, вызванных эрозионными процессами, вычислены для основных врезов и представлены на рис. 6. Для каждого вреза посчитано среднее изменение высотных отметок, которое показано на рисунке цветом. Для большей части эрозионных врезов характерно углубление на 10 см с 2010 по 2011 гг., максимальное среднее углубление отдельного вреза составляет 70 см, а максимальное углубление в пределах отдельного вреза 1.8 м. Быстро растущие эрозионные ложбины расположены вдоль северной части оползневого склона, на пойме и на крутом склоне долины р. Чульмакан юго-западной экспозиции.

Таблица 3. Проявления сильных изменений рельефа на аэрофотоснимках

	<p>Трещины (1, 2) на оползневом склоне – зоны сильного понижения поверхности</p>
<p>Проявления изменений рельефа, связанные с инженерной деятельностью</p>	
<p>Аэрофотоснимок 2010 г.</p>	<p>Аэрофотоснимок 2011 г.</p>
<p>Участок понижения поверхности в результате удаления искусственного вала (1)</p>	
	
<p>Участок повышения поверхности в результате противоэрозионных мероприятий (1) и участок понижения поверхности в результате удаления искусственных валов в районе опоры ЛЭП (2)</p>	
	

Динамика рельефа при термокарстовых процессах. Изменения высотных отметок вокруг очагов первичного проявления термокарстовых процессов незначительны, среднее понижение составляет 5 см, максимальное среднее понижение отдельного очага 18 см, а максимальное понижение в пределах отдельного очага – 1.7 м (рис. 7). Значительная часть очагов фактически не изменяется. Большинство очагов расположено вдоль грунтовой дороги. Анализ показывает, что сочетание методов обработки

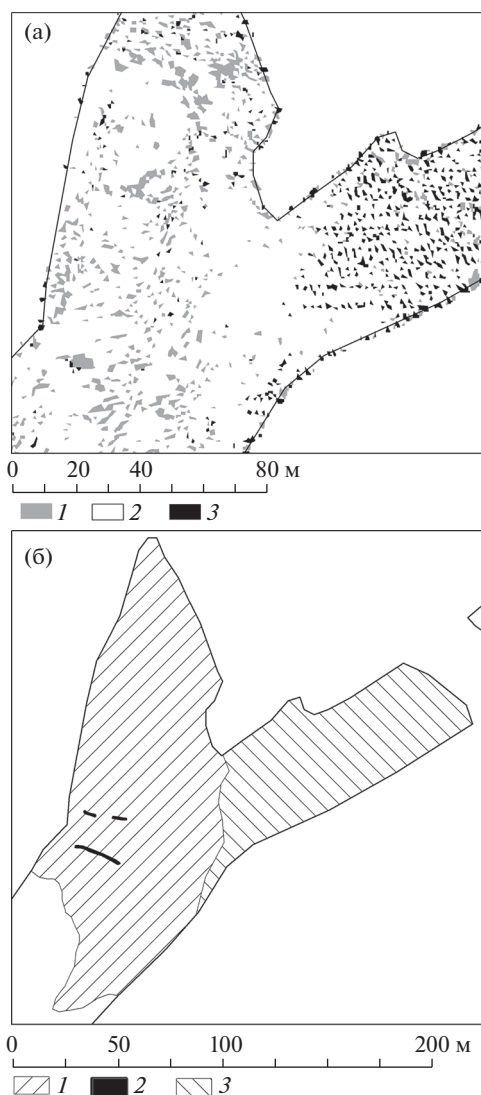


Рис. 5. Изменение рельефа в пределах оползневого участка трассы.

(а) – повышения и понижения поверхности. *Изменения рельефа:* 1 – участки понижения высотных отметок, 2 – отсутствие изменений рельефа, 3 – участки повышения высотных отметок.

(б) – участки оползня, где происходит преимущественное понижение или повышение поверхности. *Оползнеопасный участок:* 1 – с преимущественным понижением поверхности, 2 – с развитием трещин, 3 – с преимущественным повышением поверхности.

разницы ЦМР, построенных по ВЛС, с применением высокодетальной аэрофото­съемки позволяет эффективно выявлять даже небольшие по амплитуде участки про­явления эрозионных и термокарстовых процессов.

Определение объема смещения грунтовых масс. Произведена оценка смещения грун­товых масс как в целом для всего участка, так и для областей развития определенных ЭГП (табл. 4). В целом происходит смещение грунтовых масс с понижением высотных отметок. Это может быть связано с выносом материала в результате оползневых и эро-

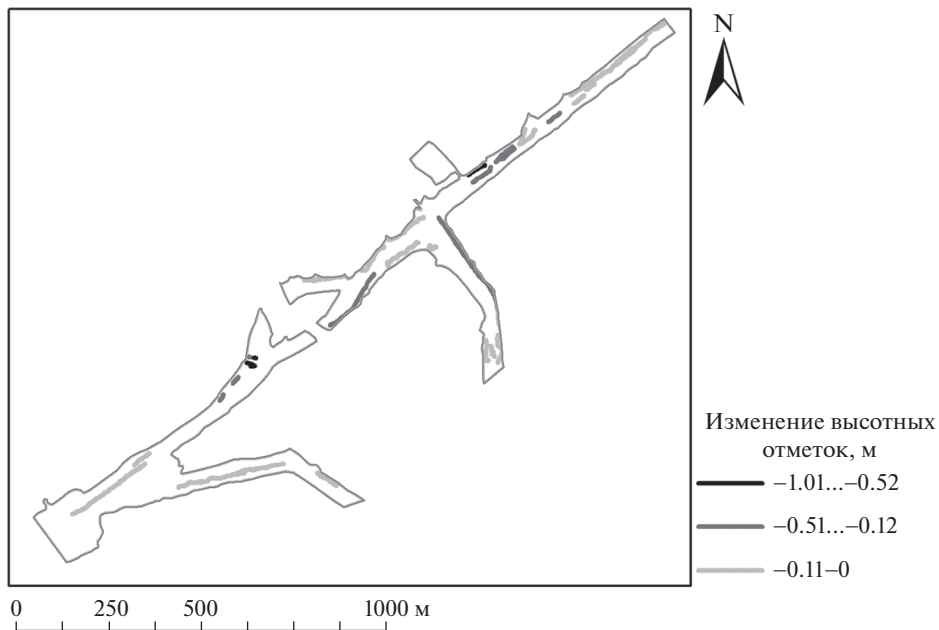


Рис. 6. Изменения рельефа под воздействием эрозии.

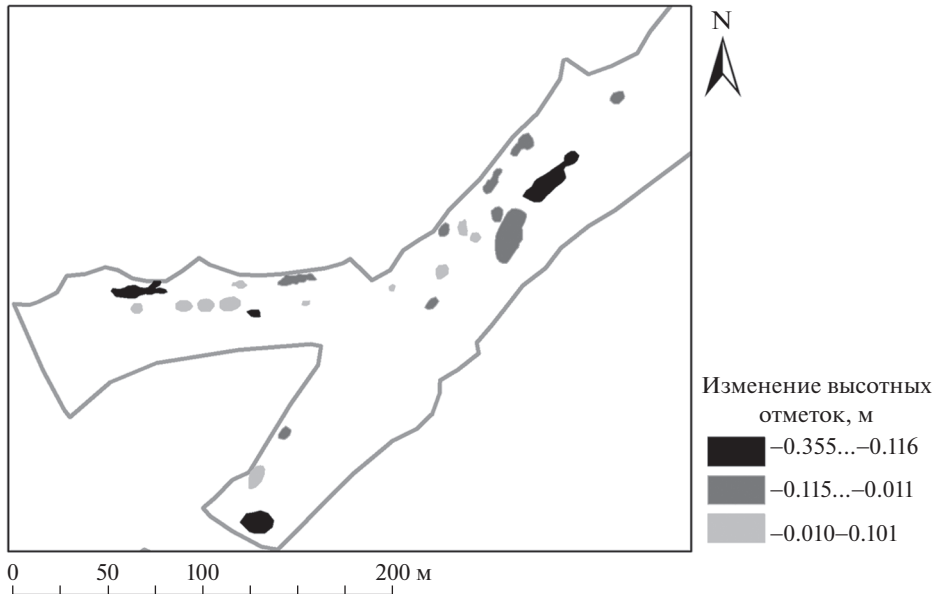


Рис. 7. Изменения рельефа вокруг первичных очагов термокарстовых процессов.

зионных процессов за пределы изучаемого участка, с развитием термокарста, с размывом грунта под действием эрозионных процессов, а также с антропогенной деятельностью – разравниванием строительных площадок и вывозом грунта. Анализ табл. 4 по-

Таблица 4. Объемы смещения грунтовых масс

Процесс	Объем, м ³	Примечание
<i>По всей площади (площадь исследуемого участка – 223700 м²)</i>		
Смещение материала с понижением высотных отметок	3827	
Смещение материала с повышением высотных отметок	1890	
Общее изменение	5717	
<i>В пределах оползневого участка (площадь участка – 17413 м²)</i>		
Смещение материала с понижением высотных отметок	1161	Смещение материала может быть связано с оползновыми движениями и эрозионными процессами, а также с деятельностью человека
Смещение материала с повышением высотных отметок	753	Смещение материала может быть связано как с аккумуляцией материала, смещенного оползновыми процессами, так и с возможными процессами выдавливания материала, а также с деятельностью человека
<i>В пределах участков, где развиты процессы термокарста (площадь участков – 1385 м²)</i>		
Участки с понижением высотных отметок	121	Возникают просадки в связи с деградацией мерзлоты
<i>В пределах основных эрозионных врезов (длина врезов – 4683 м)</i>		
Смещение материала с понижением высотных отметок	556	Смещение материала обусловлено увеличением эрозионных врезов
Смещение материала с повышением высотных отметок	167	Смещение материала может быть обусловлено частичным накоплением материала на конусах выноса, а также деятельностью человека (противоэрозионные мероприятия)

казывает, что в пределах оползневого участка происходит достаточно активное смещение грунтовых масс. Объемы движения грунтовых масс в результате действия эрозионных и термокарстовых процессов заметно меньше.

ВЫВОДЫ

Проанализированы возможности использования ВЛС для анализа рельефа. Показана возможность использования результатов двух повторных данных ВЛС одной сходной точности. На основе воздушного лазерного сканирования выявлены участки изменения поверхности и построены соответствующие карты.

Наиболее значительными являются изменения рельефа в пределах оползневого участка (зона трещин), кроме того, большие изменения отмечаются на участках прямых техногенных воздействий. Менее значительные изменения фиксируются в зонах сноса и накопления материала на оползневом участке; на участках развития эрозионных процессов и по периферии очагов термокарста отмечены понижения отметок высот.

Сочетание методов анализа разницы ЦМР, построенных по ВЛС, и высокодетальной аэрофотосъемки позволяет эффективно выявлять даже небольшие по амплитуде участки проявления оползневых, эрозионных и термокарстовых процессов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Викторов А.С., Орлов Т.В., Капралова В.Н., Трапезникова О.Н., Архипова М.В., Березин П.В., Зверев А.В., Садков С.А., Панченко Е.Г.* Математическая морфология ландшафтов криоликтозоны. М.: Изд-во РУДН, 2016. 230 с.
2. *Селезнева Е.В.* Применение лазерного сканирования в геоморфологических исследованиях // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: География.* 2013. № 2. С. 47–53.
3. *Широкова Т.А., Антипов А.В., Арбузов С.А.* Определение изменений на местности с применением данных лидарной съемки // *Интерэкспо Гео-Сибирь.* 2012. № 4. С. 39–46.
4. *van Westen C.J., Castellanos E., and Kuriakose S.L.* Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview // *Engineering Geology.* 2008. № 102. P. 112–131.
5. *Jaboyedoff M., Oppikofer T., Abellan A., Derron M., Loye A., Metzger R., and Pedrazzini A.* Use of LIDAR in landslide investigations: a review // *Natural Hazards.* 2012. No. 61. P. 5–28.
6. *Ardizzone F., Cardinali M., Galli M., Guzzetti F., and Reichenbach P.* Identification and mapping of recent rainfall-induced landslides using elevation data collected by airborne Lidar // *Natural Hazards and Earth System Sci.* 2007. Vol. 7. No. 6. P. 637–650.
7. *Chigira M., Duan F., Yagi H., and Furuya T.* Using an airborne laser scanner for the identification of shallow landslides and susceptibility assessment in an area of ignimbrite overlain by permeable pyroclastics // *Landslides.* 2004. Vol. 1. No. 3. P. 203–209.
8. *Dunning S., Massey C., Rosser N.* Structural and geomorphological features of landslides in the Bhutan Himalaya derived from Terrestrial Laser Scanning // *Geomorphology.* 2009. Vol. 103. No. 1. P. 17–29.
9. *Glenn N., Streutker D., Chadwick D., Thackray G., and Dorsch S.* Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity // *Geomorphology.* 2006. Vol. 73. No. 1–2. P. 131–148.
10. *McKean J.* Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry // *Geomorphology.* 2004. Vol. 57. No. 3–4. P. 331–351.
11. *van den Eeckhaut M., Poesen J., Verstraeten G., Vanacker V., Nyssen J., Moeyersons J., van Beek L.P.H., and Vandekerckhove L.* Use of LIDAR-derived images for mapping old landslides under forest // *Earth Surf. Processes. Landf.* 2007. Vol. 32. No. 5. P. 754–769.
12. *Viero A., Teza G., Massironi M., Jaboyedoff M., and Galgaro A.* Laser scanning-based recognition of rotational movements on a deep seated gravitational instability: The Cinque case (North-Eastern Italian Alps) // *Geomorphology.* 2010. Vol. 122. No. 1–2. P. 191–204.
13. *Heritage G.L. and Milan D.J.* Terrestrial laser scanning of grain roughness in a gravel-bed river // *Geomorphology.* 2009. Vol. 113. No. 1–2. P. 4–11.
14. *James L.A., Watson D.G., and Hansen W.F.* Using LiDAR data to map gullies and headwater streams under forest canopy: South Carolina, USA // *Catena.* 2007. Vol. 71. No. 1. P. 132–144.
15. *Schmid T. and Hildebrand E.* A case study of terrestrial laser scanning in erosion research: calculation of roughness and volume balance at a logged forest site // *Intern. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sci.* 1998. Vol. 36. No. 8/W2.
16. *Thoma D., Gupta S., Bauer M., and Kirchoff C.* Airborne laser scanning for riverbank erosion assessment // *Remote Sensing of Environment.* 2005. Vol. 95. No. 4. P. 493–501.
17. *Орлов Т.В., Садков С.А.* Исследование карстового рельефа восточной части плато Лаго-Наки методами высотного лазерного сканирования (lidar) и дешифрирования аэрофотоснимков высокого разрешения // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология.* 2015. № 4. С. 365–376.
18. *Saye S., van der Wal D., Pye K., and Blott S.* Beach-dune morphological relationships and erosion/accretion: An investigation at five sites in England and Wales using LIDAR data // *Geomorphology.* 2005. Vol. 72. No. 1–4. P. 128–155.
19. *Антипов А.В.* Влияние плотности точек воздушного лазерного сканирования на точность создания цифровой модели рельефа местности // *Интерэкспо Гео-Сибирь.* 2010. № 1. С. 18–23.
20. *Ессин А.С., Хамитов Э.Т.* Исследование точности построения цифровых моделей рельефа по материалам воздушного лазерного сканирования территории г. Омска // *Интерэкспо Гео-Сибирь.* 2010. № 3. С. 73–74.

21. *Рыльский И.А.* Лазерно-локационная аэросъемка – особенности метода и перспективы его применения для географических исследований // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2008. № 4. С. 29–33.
22. Геокриология СССР. Средняя Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 414 с.
23. Южная Якутия. Мерзлотно-гидрогеологические и инженерно-геологические условия Алданского горнопромышленного района. М.: Изд-во МГУ, 1975. 445 с.
24. *Kazeev A. and Postoev G.* Landslide investigations in Russia and in the USSR // *Natural Hazards*. 2017. No. 88. P. 81–101.
25. *Тржцинский Ю.Б.* Глубокие оползни Восточной Сибири // *Геоэкология*. 1996. № 5. С. 74–88.
26. *Shepard D.* A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data // *Proceedings of the 1968 ACM National Conference*. 1968. P. 517–524.
27. ArcGIS9 Spatial Analyst. Руководство пользователя, ESRI 1999–2001, пер. DATA+ [Электронный ресурс]. URL: <https://www.esri.com/library/brochures/pdfs/spatialanalystbro.pdf> (дата обращения: 10.09.2019).
28. *Gimmery V.* User Guide for SAGA (version 2.0.5) [Электронный ресурс]. URL: https://sagatutorials.files.wordpress.com/2016/02/saga_manual_english_cdu_june-2017.pdf (дата обращения: 10.09.2019).
29. *Jenks G.F.* The Data Model Concept in Statistical Mapping // *International Yearbook of Cartography*. 1967. No. 7. P. 186–190.

The Use of Aerial Photography and Airborne Laser Scanning to Identify the Dynamics of Exogenic Processes as a Basis for Hazard Assessment

**M. V. Arkhipova^a, A. S. Victorov^a, T. V. Orlov^{a, #}, A. I. Kazeev^a,
V. N. Kapralova^a, and O. N. Trapeznikova^a**

^a *Sergeyev Institute of Geoecology RAS, Moscow, Russia*

[#] *E-mail: tim.orlov@gmail.com*

Using repeated laser scanning, we analyzed the dynamics of exogenic geological processes (EGP) such as landslides, fluvial erosion, and thermokarst, for a pipeline section with a high concentration of these hazards. Air-borne imagery and field works were involved in detecting foci of the EPG. We compared laser scanning data from 2010 to 2011 and estimated topography changes resulted from the geological hazard activity in the pipeline vicinity. Variations of the topography at the landslide area were the greatest as well as those at the section with intense industrial activity. Fewer changes were found in the zones of removal and accumulation of material within the landslide area. We also detected a decrease of height marks in the areas of fluvial erosion and thermokarst sinks peripheries. In particular, the removal of 3827 m³ of material in the upper part of the test area resulted to noticeable lowering of the surface, and accumulation of 1890 m³ of material caused the rise of surface height.

Keywords: hazardous geological processes, laser scanning, dynamics, pipelines

ACKNOWLEDGMENTS

The research was carried out in the framework of the state task.

REFERENCES

1. Viktorov A.S., Orlov T.V., Kapralova V.N., Trapeznikova O.N., Arkhipova M.V., Berezin P.V., Zverev A.V., Sadkov S.A., and Panchenko E.G. *Matematicheskaya morfologiya landshaftov kriolitozony* (Mathematical morphology of cryolithozone landscapes). M.: RUDN, 2016. 230 p. (in Russ.)
2. Selezneva E.V. *Primenenie lazernogo skanirovaniya v geomorfologicheskikh issledovaniyakh* (Use of laser scanning in geomorphological researches). *Vestn. Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 2013. No. 2. P. 47–53. (in Russ.)
3. Shirokova T.A., Antipov A.V., and Arbuzov S.A. *Opreделение izmenenii na mestnosti s primeneniem dannykh lidarnoi s'emki* (Spotting of environmental changes using LIDAR data). *Interespo Geo-Sibir'*. 2012. No. 4. P. 39–46. (in Russ.)
4. van Westen C.J., Castellanos E., and Kuriakose S.L. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*. 2008. No. 102. P. 112–131.
5. Jaboyedoff M., Oppikofer T., Abellan A., Derron M., Loya A., and Metzger R., Pedrazzini A. Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Nat Hazards*. 2012. No. 61. P. 5–28.

6. Ardizzone F., Cardinali M., Galli M., Guzzetti F., and Reichenbach P. Identification and mapping of recent rainfall-induced landslides using elevation data collected by airborne Lidar. *Natural Hazards and Earth System Sci.* 2007. Vol. 7. No. 6. P. 637–650.
7. Chigira M., Duan F., Yagi H., and Furuya T. Using an airborne laser scanner for the identification of shallow landslides and susceptibility assessment in an area of ignimbrite overlain by permeable pyroclastics. *Landslides.* 2004. Vol. 1. No. 3. P. 203–209.
8. Dunning S., Massey C., and Rosser N. Structural and geomorphological features of landslides in the Bhutan Himalaya derived from Terrestrial Laser Scanning. *Geomorphology.* 2009. Vol. 103. No. 1. P. 17–29.
9. Glenn N., Streutker D., Chadwick D., Thackray G., and Dorsch S. Analysis of LIDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology.* 2006. Vol. 73. No. 1–2. P. 131–148.
10. McKean J. Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology.* 2004. Vol. 57. No. 3–4. P. 331–351.
11. van den Eeckhaut M., Poesen J., Verstraeten G., Vanacker V., Nysen J., Moeyersons J., van Beek L.P.H., and Vandekerckhove L. Use of LIDAR-derived images for mapping old landslides under forest. *Earth Surf. Processes. Landf.* 2007. Vol. 32. No. 5. P. 754–769.
12. Viero A., Teza G., Massironi M., Jaboyedoff M., and Galgaro A. Laser scanning-based recognition of rotational movements on a deep seated gravitational instability: The Cinque case (North-Eastern Italian Alps). *Geomorphology.* 2010. Vol. 122. No. 1–2. P. 191–204.
13. Heritage G.L. and Milan D.J. Terrestrial laser scanning of grain roughness in a gravel-bed river. *Geomorphology.* 2009. Vol. 113. No. 1–2. P. 4–11.
14. James L.A., Watson D.G., and Hansen W.F. Using LiDAR data to map gullies and headwater streams under forest canopy: South Carolina, USA. *Catena.* 2007. Vol. 71. No. 1. P. 132–144.
15. Schmid T. and Hildebrand E. A case study of terrestrial laser scanning in erosion research: calculation of roughness and volume balance at a logged forest site, in *Intern. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sci.* 1998. Vol. 36. No. 8/W2.
16. Thoma D., Gupta S., Bauer M., and Kirchoff C. Airborne laser scanning for riverbank erosion assessment. *Remote Sensing of Environment.* 2005. Vol. 95. No. 4. P. 493–501.
17. Orlov T.V. and Sadkov S.A. *Issledovanie karstovogo rel'efa vostochnoi chasti plato Lago-Naki metodom vysotnogo lazernogo skanirovaniya (lidar) i deshifirovaniya aerofotosnimkov vysokogo razresheniya* (Studying Karst Relief in the Eastern Lago-Naki Plateau Using LIDAR and High-Resolution Aerial Photographs), in *Geokologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya.* 2016. Vol. 4. P. 365–376. (in Russ.)
18. Saye S., van der Wal D., Pye K., and Blott S. Beach-dune morphological relationships and erosion/accretion: An investigation at five sites in England and Wales using LIDAR data. *Geomorphology.* 2005. Vol. 72. No. 1–4. P. 128–155.
19. Antipov A.V. *Vliyaniye plotnosti tochek vozdušnogo lazernogo skanirovaniya na tochnost' sozdaniya tsifrovoy modeli rel'efa mestnosti* (Effect of points density of laser scanning on DEM creation), in *Interesko Geo-Sibir'.* 2010. No. 1. P. 18–23. (in Russ.)
20. Essin A.S. and Khamitov E.T. *Issledovanie tochnosti postroeniya tsifrovyykh modelei rel'efa po materialam vozdušnogo lazernogo skanirovaniya territorii g. Omska* (Research of DEM building accuracy based on data of aerial laser scanning of Omsk city territory), in *Interesko Geo-Sibir'.* 2010. No. 3. P. 73–74.
21. Ryl'skii I.A. *Lazerno-lokatsionnaya aeros'emka – osobennosti metoda i perspektivy ego primeneniya dlya geograficheskikh issledovaniy* (Laser locator airphotography: method features and prospect of its using for geographical researches). *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya.* 2008. No. 4. P. 29–33.
22. *Geokriologiya SSSR. Srednyaya Sibir'* (Geocryology of the USSR. Middle Siberia). Ed.: E.D. Ershova. M.: Nedra, 1989. 414 p. (in Russ.)
23. *Yuzhnaya Yakutiya. Merzlotno-gidrogeologicheskie i inzhenerno-geologicheskie usloviya Aldanskogo gornopromyshlennogo raiona.* (South Yakutia. Permafrost-hydrogeological and geotechnical conditions of Aldan mining region) M.: Izd-vo MGU, 1975. 445 p. (in Russ.)
24. Kazeev A. and Postoev G. Landslide investigations in Russia and in the USSR. *Natural Hazards.* 2017. No. 88. P. 81–101.
25. Trzhtsinskii Yu.B. *Glubokie opolzni Vostochnoi Sibiri* (Deep landslides of Eastern Siberia). *Geokologiya.* 1996. No. 5. P. 74–88. (in Russ.)
26. Shepard D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data, in *Proceedings of the 1968 ACM National Conference.* 1968. P. 517–524. doi:10.1145/800186.810616
27. ArcGIS9 Spatial Analyst. ESRI 1999–2001. DATA+ URL: <https://www.esri.com/library/brochures/pdfs/spatialanalystbro.pdf>
28. Gimery V. User Guide for SAGA (version 2.0.5). URL: https://sagatutorials.files.wordpress.com/2016/02/saga_manual_english_cdu_june-2017.pdf
29. Jenks G.F. The Data Model Concept in Statistical Mapping, in *International Yearbook of Cartography.* 1967. No. 7. P. 186–190.