

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБСЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ БЕРЕГОВ КРАСНОЯРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Б.Ф. Азаров (Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул)

В 1983 г. окончил аэрофотогеодезический факультет НИИГАиК (в настоящее время — СГГА) по специальности «астрономогеодезия». После окончания института работал в Алтайском политехническом институте им. И.И. Ползунова. В 1987 г. окончил аспирантуру НИИГАиК. С 1988 г. работает в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова, в настоящее время — доцент кафедры «Основания, фундаменты, инженерная геология и геодезия». Кандидат технических наук.

Е.А. Федорова (Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, Барнаул)

В 2006 г. окончила географический факультет Алтайского государственного университета по специальности «физическая география и ГИС». С 2006 г. работает в Институте водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, в настоящее время — инженер.

В рамках полевого этапа работ по теме «Исследование морфометрических характеристик Красноярского водохранилища и разработка научно-обоснованных рекомендаций по предупреждению вредного воздействия вод на его берега», летом 2013 г., сотрудниками Института водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН и Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова было выполнено обследование береговых участков Красноярского водохранилища с наиболее интенсивным развитием опасных геологических процессов с применением технологии наземного лазерного сканирования (НЛС).

Красноярское водохранилище образовано на реке Енисей после возведения плотины Красноярской ГЭС у г. Дивногорска. Наполнение водохранилища началось в 1967 г., а в 1970 г. впервые была достигнута отметка нормального подпорного уровня (НПУ). Протяжен-

ность водохранилища составляет около 340 км, проектная отметка НПУ — 243,0 м в Балтийской системе высот 1977 г., уровень мертвого объема (минимальный уровень водохранилища, до которого возможна его сработка в условиях нормальной эксплуатации — прим. ред.) — 225,0 м в Балтийской системе высот 1977 г., максимальная глубина у плотины при НПУ — 110 м, площадь акватории при НПУ — 2000 км², полный объем при НПУ — 73,3 км³, полезный объем — 30,4 км³.

Однако при длительной эксплуатации гидроузла (для Красноярского водохранилища — это 45 лет) паспортные морфометрические характеристики котловины заметно изменяются. Со временем площадь водохранилища возрастает и, как следствие, происходит потеря земель на его побережьях в результате переработки берегов. На Красноярском водохранилище переработка берегов происходит за счет воздействия вет-

ровых волн и развития склоновых (оползневых, обвально-осыпных) процессов, сопровождаясь не только изменением морфометрических характеристик водоема, но и влияя на его состояние.

Основной целью полевых работ являлось обследование берегов Красноярского водохранилища для определения характера и масштаба изменения его морфометрических характеристик за период эксплуатации. Для этого решались следующие задачи по количественной оценке масштаба переработки берегов:

— установление фактических границ береговой полосы на опасных участках переработки берегов;

— детальное обследование участков с наиболее интенсивным развитием опасных геологических процессов с построением продольных и поперечных профилей;

— топографическая съемка крупного масштаба ключевых

участков, выбранных для ведения мониторинга береговых процессов.

Кроме того, одной из целей выполнения работ было продемонстрировать эффективность применения технологии НЛС при обследовании берегов Красноярского водохранилища, для чего было выбрано четыре ключевых участка (рис. 1). Полевые работы на этих участках выполнялись с 15 по 28 июня 2013 г.

Участок № 1 — осыпь севернее залива Огур (географические координаты: $55^{\circ}18'25''$ с. ш., $92^{\circ}11'26''$ в. д.). Он представляет собой склон протяженностью около 600 м и крутизной от 45° до 90° с высотой над урезом воды до 120 м.

Участок № 2 — склон в районе населенного пункта Куртак (географические координаты: $55^{\circ}08'52''$ с. ш., $91^{\circ}33'33''$ в. д.). Он представляет собой склон протяженностью около 580 м и крутизной от 21° до 86° с высотой над урезом воды до 35 м.

Участок № 3 расположен в районе населенного пункта Краснотуранск на берегу залива Сыда (географические координаты:

$54^{\circ}20'19''$ с. ш., $91^{\circ}32'08''$ в. д.). Он имеет протяженность около 425 м и ширину около 80 м. Перепад высот на участке составляет от 4,0 до 14,5 м над урезом воды.

Участок № 4 — пляж в населенном пункте Лебяжье в районе действующего водомерного поста (географические координаты: $54^{\circ}11'24''$ с. ш., $91^{\circ}34'08''$ в. д.). Протяженность участка более 400 м, ширина до бровки высокого берега — 135 м. Высота бровки над урезом воды 6,4 м.

Наземное лазерное сканирование выполнялось прибором GLS-1500 (Торсон, Япония), съемочное обоснование создавалось с помощью электронного тахеометра TS06 (Leica Geosystems, Швейцария). Камеральная обработка результатов сканирования (так называемых сканов) осуществлялась с помощью программы ScanMaster (Торсон).

В процессе камеральной обработки для каждого ключевого участка выполнялись ввод и привязка сканов, создание «облака точек», построение цифровых моделей рельефа (ЦМР) в

виде TIN-поверхностей, экспорт результатов сканирования в ПО AutoCAD для построения крупномасштабных топографических планов, продольных и поперечных профилей по заданным направлениям.

Технология НЛС для решения большого количества метрических задач начала использоваться в России более 10 лет назад. В настоящее время НЛС становится все более доступным видом геодезических измерений. Основное назначение сканирования — получение точных геометрических характеристик объекта, которые могут быть дополнены любой атрибутивной информацией. По сути, лазерное сканирование — это метод, позволяющий создать цифровую модель окружающего пространства, представив его набором точек с пространственными координатами.

Наземное лазерное сканирование целесообразно использовать в том случае, когда применение стандартных геодезических приемов и приборов для получения геометрических характеристик таких природных объектов, как оползни, обрывы, осыпи, обвалы, затруднено, а зачастую невозможно. Бесспорным преимуществом технологии НЛС является:

- дистанционное получение информации, т. е. безопасное для исполнителя;

- оперативность и высокая производительность работ;

- высокая степень детализации при определении координат объекта;

- возможность трехмерной визуализации объекта как в режиме реального времени (в момент выполнения съемки), так и в процессе обработки и интерпретации результатов сканирования.

Как уже отмечалось выше, работы по наземному лазерному сканированию проводились с целью детального обследования участков берегов Красно-

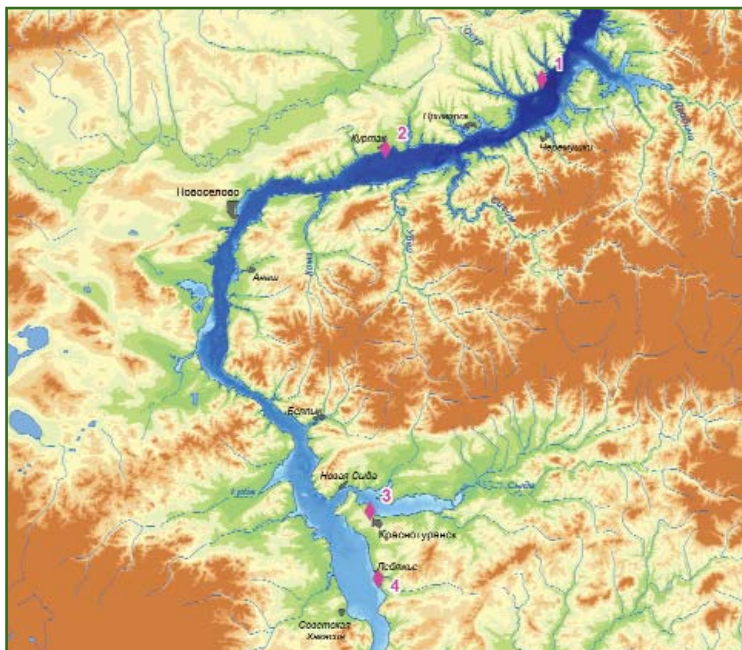


Рис. 1
Расположение ключевых участков

ярского водохранилища с наиболее интенсивным развитием опасных геологических процессов. Фактически в данном случае технология НЛС использовалась для выполнения инженерно-геодезических работ, сопровождающих инженерно-геологические изыскания в районах развития процессов переработки берегов. Общие технические требования и правила проведения такого рода работ, согласно пункту 6.2.7 [1], регламентируются пунктами 10.47–10.63 [2]. На практике выбор того или иного метода работ определяется условиями их выполнения и характером самого объекта наблюдений. Однако основные технологические процессы, определяющие состав геодезических работ, не зависят от средств и методов их выполнения. Поэтому при наземном лазерном сканировании природных объектов целесообразно было придерживаться следующей последовательности работ:

- 1) рекогносцировка участка работ;
- 2) создание геодезической основы (планово-высотного съемочного обоснования);
- 3) выбор метода геодезической привязки точек, с которых выполняется НЛС (так называемых станций) или результатов сканирования с них;
- 4) собственно сканирование;
- 5) камеральная обработка сканов;
- 6) интерпретация результатов сканирования.

Рекогносцировка участка предполагает предварительное непосредственное обследование местности в районе работ. В процессе рекогносцировки определяются места установки сканера и специальных марок, которые используются при обработке для объединения отдельных сканов в единую систему координат.

Поскольку береговые участки, на которых выполнялись ра-

боты по сканированию, находились на значительном удалении друг от друга, то для их съемки единая геодезическая основа не создавалась. С учетом основного масштаба отчетных картографических материалов по результатам обследования берегов Красноярского водохранилища (1:25 000) фактически было достаточно определить только географические координаты отдельных точек на выбранных участках работ. В качестве таких точек принимались урезы воды водохранилища, точки планово-высотного съемочного обоснования, которые по возможности совмещались с местами установки специальных марок и сканера. Географические координаты отдельных точек определялись с помощью GPS-навигатора Garmin. Их точность составляла порядка 0,1" по широте и долготе, что в линейной мере соответствует примерно 3–5 м в плане и по высоте.

Планово-высотное съемочное обоснование на каждом ключевом участке создавалось отдельно в условной системе координат с помощью электронного тахеометра TS06 методом полярной засечки. При этом ось абсцисс (X) располагалась либо вдоль берега, либо перпендикулярно к нему, а ось ординат (Y) — справа от оси X. Высоты точек задавались также в условной системе. Предельная погрешность получения координат и высот точек съемочного обоснования определялась точностью тахеометра и составляла порядка 1 см в плане и по высоте.

Выбор метода геодезической привязки результатов сканирования зависит от условий района работ и его размеров.

При сканировании каждый скан, полученный на станции, представляет собой массив точек с пространственными прямоугольными координатами, определенными в системе координат сканера, т. е. в локальной системе координат. Для прив-

едения данных сканирования в единую систему координат необходимо в ходе сканирования выполнить так называемую «регистрацию» — пространственную привязку каждого скана.

Согласно руководству пользователя [3] при использовании сканера GLS-1500 существует три варианта пространственной привязки сканов:

1) по узловым точкам — для каждой пары смежных сканов должны быть отсканированы минимум три общие специальные марки;

2) по координатам точки стояния прибора и точки установки ориентирного пункта (ОРП) — «станция — ОРП», в этом случае на станции обязательно должна быть отсканирована марка, установленная на ОРП;

3) по обратной засечке специальных марок — на станции обязательно должны быть отсканированы минимум две специальные марки с известными пространственными прямоугольными координатами.

Первый вариант пространственной привязки скана возможен как при горизонтальном положении сканера, так и при наклоне, когда прибор размещается в специальной подставке. Второй и третий варианты привязки возможны только при условии, когда сканер расположен в горизонтальной плоскости.

Следует отметить, что описанная выше пространственная привязка сканов позволяет в процессе обработки объединить сканы только в локальной системе координат прибора.

Если окончательные результаты сканирования должны быть представлены в заданной системе координат, установленной техническим заданием, то необходимо выполнить геодезическую привязку, т. е. определить координаты узловых точек (на практике — мест установки специальных марок), используемых для объединения данных сканирования с разных

станций, в той системе координат, в которой требуется представить конечные результаты сканирования.

На каждом ключевом участке конечные результаты сканирования представлялись в собственной локальной системе координат. Поэтому все специальные марки и, по возможности, точки стояния сканера координировались с помощью электронного тахеометра методом полярной засечки в системе координат участка. При окончательной обработке материалов сканирования за начало отсчета высот на каждом участке принималось значение высоты уреза воды на дату выполнения работ.

На исследуемых участках сканирование проводилось как с одной стоянки прибора, так и с нескольких (двух). При этом сканер находился либо в горизонтальном положении, либо в наклонном (рис. 2).

Последовательность действий на каждой станции была следующей. После установки прибора на штатив и его включения, автоматически выполнялся прогрев прибора. Затем создавался так называемый «проект» для выполнения измерений и задавались параметры, относящиеся к сеансу сканирования (название станции, при необходимости — имя ОРП, сведения о марке, пространственные координаты и т. д.). Затем, в зависимости от выбранного варианта пространственной привязки сканов, осуществлялся один из двух типов сканирования:

- регистрация положения марки ОРП (или нескольких марок) и трехмерное сканирование объекта;

- трехмерное сканирование объекта.

Для регистрации положения марки ОРП (или нескольких марок) достаточно было навести прибор на марку и дать команду на распознавание. Наведение на марку выполнялось с по-



Рис. 2

Горизонтальное (слева) и наклонное (справа) положение прибора при сканировании

мощью специального визира и окна видоискателя на приборе вручную, либо с помощью встроенной видеокамеры, когда управление сканером осуществлялось дистанционно с помощью персонального компьютера (ноутбука).

Перед запуском процесса трехмерного сканирования объекта определялась область сканирования путем указания ее верхнего левого и нижнего правого углов. Причем границы области сканирования задавались либо с панели управления прибора, либо с компьютера. После этого указывалась плотность сканирования. В GLS-1500 эта операция может быть осуществлена тремя способами. Первый способ предусматривает введение расстояния до объекта и шага между сканируемыми точками по горизонтали и вертикали (расстояние до объекта может быть определено с помощью специальной функции в режиме настройки при нажатии клавиши «звездочка»). Второй — ввод общего количества сканируемых точек, а третий — задание горизонтального и вертикального угла между сканируемыми точками.

Далее, задав имя скана, приступали к выбору типа данных сканирования. Ими могут быть

трехмерные координаты и фотоснимки объекта, либо только координаты и только фотоснимки. Затем запускался процесс сканирования.

Камеральная обработка результатов сканирования предусматривала два этапа: предварительный и основной.

На предварительном этапе после окончания сканирования осуществлялся просмотр полученных результатов. Для этого использовалась программа ScanMaster, предназначенная для управления сканером и обработки результатов сканирования. «Сырые» данные сканирования (сканы) загружались в программу. Поскольку в программе ScanMaster хранение и организация данных осуществляется в проекте архивов, после загрузки данных создавался так называемый «проект». Проект — это набор баз данных и внешних ресурсных файлов, логически сформированных по папкам. При создании нового проекта программой автоматически создается папка для его хранения. Проект также может быть импортирован в программу ScanMaster с SD-карты, на которую записываются результаты сканирования в процессе выполнения работ.

После загрузки данных сканирования и создания проекта приступали к обработке. Если перед выполнением сканирования были определены координаты точки стояния прибора или координаты узловых точек (мест установки специальных марок), т. е. предварительно создано съемочное обоснование, то преобразование данных сканирования в единую систему координат проекта происходило автоматически. В противном случае, с помощью функции регистрации программы ScanMaster и варианта пространственной привязки сканов, выполнялось их объединение и преобразование в единую систему координат.

Следует отметить, что в полевых условиях предпочтительнее использовать именно автоматическое преобразование координат проекта, так как в этом случае есть возможность оценить полноту и подробность сканирования объекта в целом, а также точность полученной модели средствами программы ScanMaster. В программе предусмотрена возможность определения ошибки в положении связующих точек по трем координатным осям.

На основном этапе осуществлялось преобразование зарегистрированной трехмерной модели объекта (т. е. перевод в заданную систему координат), удаление «шумов» — отразившихся на сканах посторонних объектов (кустарника, деревьев, людей, техники и т. п.), формирование «облаков точек», создание поверхностей, построение горизонталей, профилей и т. д. Это наиболее трудоемкий этап обработки, так как приходится анализировать значительный объем информации, полученной при сканировании, зачастую избыточной.

Интерпретация результатов сканирования заключалась в представлении данных сканирования в виде, удобном для заказчика. В нашем случае по

каждому ключевому участку, на котором было выполнено сканирование, создавалась следующая информация:

а) файлы пространственных прямоугольных координат «облаков точек» (в формате TXT) с дискретностью 5–10 м в условной системе координат с приведением высот к урезу воды на дату съемки;

б) продольные и поперечные профили, построенные в характерных местах;

в) топографические планы масштаба 1:1000 с высотой сечения рельефа 0,1; 0,25; 0,5; 1,0 и 5 м в зависимости от перепада высот на участке.

Остановимся более подробно на особенностях выполнения работ по наземному лазерному сканированию на отдельных береговых участках Красноярского водохранилища.

На участке № 1 (рис. 3), где перепад высот между урезом воды и верхней бровкой достигал 120 м, а крутизна склона составляла от 45° до 90°, сканирование выполнялось с рубки теплохода с высоты над урезом воды около 6,5 м (рис. 4). Это позволило максимально увеличить область сканирования и обеспечить достаточную устойчивость прибора во время работы.

На берегу было создано съемочное обоснование (с обязательной привязкой по высоте к урезу воды) в виде трех точек, на которых устанавливались специальные марки. Точки были разнесены на расстояние около 130 м вдоль берега и на 18 м от уреза перпендикулярно склону. Перепад высот между точками составлял от 2,5 до 16,5 м при максимальной высоте над уре-



Рис. 3
Участок № 1, вид с акватории водохранилища



Рис. 4
Лазерный сканер, установленный на рубке теплохода (участок № 1)

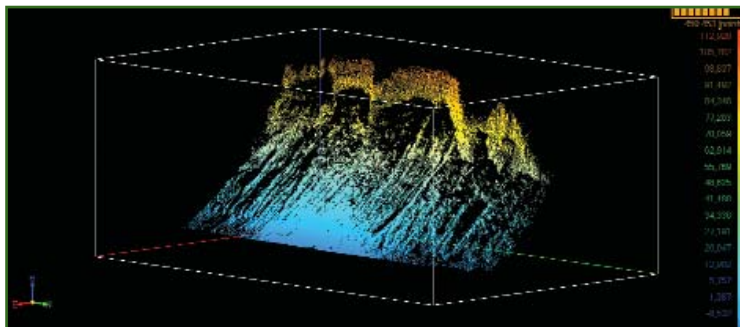


Рис. 5
Фрагмент «облака точек» участка № 1

зом 19,4 м. Сканер устанавливался напротив средней марки. Был выбран вариант регистрации данных сканирования по трем узловым точкам. В этом случае в процессе сканирования не требовалось определять координаты станции и марок. Сканирование выполнялось как при горизонтальном, так и при наклонном положении базы прибора (+30°). Результаты сканирования приведены на рис. 5. Точность геодезической привязки результатов сканирования оценивалась по результатам уравнивания измерений в программе ScanMaster: максимальная погрешность связи узловых точек по координатным осям составила 19 мм, минимальная — 1 мм.

На участке № 2, где крутизна склона составляла от 21° до 86° при высоте над урезом воды до 35 м, сканирование также выполнялось с рубки теплохода. Измерения проводились по схеме «станция — ОРП» с вводом координат точки стояния сканера и ОРП. Основание прибора располагалось горизонтально, но компенсатор сканера был отключен из-за качки судна. Погрешность в положении ОРП относительно станции по данным уравнивания измерений в программе ScanMaster составила 16 мм по высоте и 11 мм в плане.

На участках № 3 и № 4, где перепад высот был небольшой (от 6 до 14 м), сканирование выполнялось по схеме «станция —

ОРП» с предварительным созданием съемочного обоснования с помощью электронного тахеометра. Погрешность в положении ОРП относительно станции по данным уравнивания измерений в программе ScanMaster составила: в плане — не более 5 мм для участка № 3 и практически отсутствовала для участка № 4; по высоте — от 9 до 17 мм для участка № 4.

В соответствии с техническим заданием для ключевых участков Красноярского водохранилища с наиболее интенсивным развитием опасных геологических процессов были построены продольные и поперечные профили по заданным направлениям (рис. 6). Координаты точек профилей определялись в программе ScanMaster. Каждый профиль строился по предварительно созданной полилинии. Отметки точек профиля задавались в условной системе, принятой при выполнении съемки. Для удобства графического отображения

профили строились с помощью программы Excel, где по координатам точек вычислялись расстояния между ними (нарастающим итогом от начальной точки профиля).

На участках № 1, 2 и 3 с большим перепадом высот (соответственно, 120, 30 и 14 м) поперечные профили выбирались либо через точки съемочного обоснования, либо по границам участка съемки перпендикулярно урезу воды. Продольные профили располагались вдоль береговой кромки, по линиям изменения уклона склона, а также по верхней бровке склона. На участке № 4 продольные профили выбирались вдоль береговой линии, а также в виде параллельных линий, соответственно, через 10–20 м от точки уреза воды. Поперечные профили располагались по створу водомерного поста от уреза воды до бровки берегового уступа, а также слева и справа от реперов бывшего водомерного поста.

Кроме построения продольных и поперечных профилей, для ключевых участков, в пределах которых было выполнено сканирование, составлялись топографические планы масштаба 1:1000. При составлении планов принималась условная система координат, которая задавалась координатами точек съемочного обоснования. За начало отсчета высот на планах принималась отметка уреза воды на дату выполнения съемки.

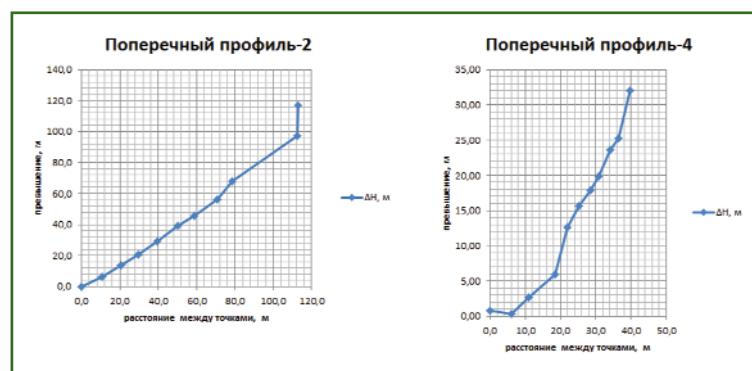


Рис. 6
Поперечные профили, построенные по данным сканирования

Данные по участкам съемки

№ участка	Наименование участка	Метод съемки	Площадь съемки, га	Высота сечения рельефа, м
1	Осыпь севернее залива Огур	НЛС	3,0	5
2	Склон в районе н/п Куртак	НЛС	2,1	1
3А	Залив Сыда	НЛС	0,28	0,5
3Б			0,08	0,25
3В			0,04	0,25
3Г			0,89	0,1
4	Н/п Лебяжье	НЛС,	1,8	0,25
		электронная тахеометрия	2,0	0,25

Сводные данные по результатам измерений на всех ключевых участках приведены в таблице.

На участке № 4 в районе населенного пункта Лебяжье съемка пляжа была выполнена как сканером, так и электронным тахеометром. Для этого участка были составлены топографические планы по данным лазерного сканирования и по материалам тахеометрической съемки.

Составление топографических планов по результатам сканирования выполнялось следующим образом. После первичной обработки по «облаку точек» для всего участка в целом или по его отдельным фрагментам средствами программы ScanMaster строилась ЦМР в виде TIN-поверхности. Из-за избыточности результатов сканирования «облако точек» приходилось «прореживать», уменьшая дискретность расположения точек модели. Так, если при сканировании максимально возможный параметр — шаг сканирования — составлял 1 м, то при «прореживании» «облака точек» дискретность для участков большой протяженности задавалась 5 или 10 м. Аналогично перед построением горизонталей средствами программы ScanMaster приходилось отфильтровывать слишком вытянутые треугольники ЦМР.

При построении горизонталей основными параметрами служили: высота сечения рельефа, длина ребра (фактически — максимальная длина стороны треугольника ЦМР, полученная при фильтрации поверхности). Полученные в программе ScanMaster горизонталей импортировались в виде файлов в форматах DXF или DWG в программу AutoCAD Civil 3D, в которой проводилось оформление топографических планов с учетом принятых правил [4].

Практически в результате обработки материалов наземного лазерного сканирования были решены следующие задачи:

1) установлены фактические границы береговой полосы на опасных участках переработки берегов;

2) проведено детальное обследование ключевых участков с наиболее интенсивным развитием опасных геологических процессов и построены 40 продольных и поперечных профилей;

3) выполнена крупномасштабная топографическая съемка четырех ключевых участков общей площадью около 9 га, выбранных для ведения мониторинга береговых процессов.

Кроме того, была продемонстрирована эффективность применения технологии НЛС при обследовании таких сложных природных объектов, как участ-

ки с проявлением опасных геологических процессов в пределах берегов Красноярского водохранилища. Эффективность этой технологии состоит, прежде всего, в сокращении времени на проведение работ, повышении степени детальности полученной метрической информации, расширении возможностей для ее представления и интерпретации.

▼ Список литературы

1. Свод Правил (СП) 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства» / Госстрой России. — М., 1997.
2. Свод Правил (СП) 11-104-97 «Инженерно-геодезические изыскания для строительства» / Госстрой России. — М., 1997.
3. Руководство пользователя ScanMaster. — Topcon Corp., 2010.
4. Условные знаки для топографических планов масштабов 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500 / Главное управление геодезии и картографии при СМ СССР. — М.: Недра, 1989. — 286 с.

RESUME

The tools and methodology of works using terrestrial laser scanning technology in specific areas of the Krasnoyarsk reservoir are considered. After processing the materials obtained, longitudinal and transverse profiles for the selected destinations in the key parts of the reservoir's shore were built. For these sites large-scale topographic maps were created.