ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЛЬЕФА БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ ПРИ АБРАЗИИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ: МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

А.С. Травникова¹, С.А. Мисиров², С.В. Бердников², Л.М. Местецкий¹

²Московский государственный университет, Москва

¹Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону

travnikova_arina@mail.ru, sam.misirov@gmail.com, berdnikovsv@yandex.ru, mestlm@mail.ru,

Аннотация. Разработан алгоритм и программное обеспечение для построения трехмерной модели местности (с использованием триангуляции Делоне) на основе так называемого «плотного облака точек», получаемого при выполнении съемки местности с беспилотного летательного аппарата (БПЛА), предложен и программно реализован алгоритм сравнения (вычитания) двух 3D-моделей, построенных по данным съемок, выполненных одинаковой камерой, но в разное время суток, в разные сезоны и на разной высоте с интервалом в 2 года, для выявления значимых изменений рельефа местности в районе берегового склона, обусловленных абразионными и обвальными процессами. Проведены экспериментальные исследования разработанного подхода на тестовом полигоне (размером 500 на 300 м) южного берега Таганрогского залива, выявлены источники возможных ошибок, сформированы рекомендации для их устранения.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, дистанционное зондирование, Таганрогский залив, береговой обрыв, метод сравнения трехмерных моделей рельефа, оценки скоростей абразии.

В настоящее время применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для получения оперативных и пространственных данных находит широкое применение в различных сферах деятельности: картография, экологический мониторинг, сельское хозяйство и т.д. Современные БПЛА и цифровые фотограмметрические системы позволяют оперативно получать данные о рельефе в виде набора высот в трехмерной системе координат («плотное облако точек» – ПОТ), цифровых моделей местности и ортофотопланов. Но существует ряд ограничений и проблем, которые связаны с оптическим методом получения данных о рельефе, закладкой надежных опорных знаков, влияния условий, при которых выполняется съемка и т.д.

В связи с этим целью исследований было предложить некоторый алгоритм (порядок действий) сравнения двух последовательных съемок одной и той же территории с БПЛА для выявления значимых отличий в рельефе.

Задача состоит в том, чтобы с помощью ПОТ для некоторого участка поверхности, полученных в разное время, локализовать участки с наиболее сильной абразией, а также оценить степень разрушения берега. Данная задача несет практическую значимость: большая часть береговой линии Азовского моря представляет собой отвесные склоны разной высоты, которые подвергаются интенсивному разрушению – за год может наблюдаться сдвиг береговой линии до 6 метров вглубь суши, однако на сегодняшний день нет постоянно функционирующей системы

мониторинга состояния береговой линии. Сравнивая разновременные данные, можно оценить направление и скорость движения эрозии, чтобы понять, где и как следует организовать защитные мероприятия.

В качестве тестового полигона был выбран участок южного берега Таганрогского залива. При этом съемки были выполнены в 2016 г. и в 2018 г. на разной высоте, в разное время суток и в разные сезоны года.

Условия съемки с БПЛА в 2016 г. и 2018 г. были разные (рис. 1, табл.1). Следует обратить внимание на то, что съемка 2016 г. выполнялась впервые и было не очень понятно, как ее делать. В дальнейшем в 2018 и 2019 гг. съемки выполнялись методически более правильно (галсами по нормали к берегу) за исключением случаев, когда доступ к определенным участкам берега был невозможен.

Для корректировки возможного смещения ПОТ относительно друг друга были выбраны 17 опорных точек, которые были узнаваемы на снимках (рис. 2А), определены их относительные географические координаты для каждой из сделанных съемок, рассчитана разница между ними и одно из ПОТ было «приведено» к другому линейным преобразованием системы координат. После этого для 15 контрольных точек (рис. 2Б) были рассчитаны отклонения и оценена точность «уравнивания» системы координат. К сожалению, ручное позиционирование опорных точек не дало возможности получить хорошее совмещение объектов, разница иногда достигала 1,5 м, что нельзя считать приемлемой точностью.

Результаты применения данного подхода к тестовому участку южного берега Таганрогского залива размером 500 на 300 м (рис. 3) показали ряд особенностей и позволили наметить план дальнейших работ.

Оказалось, что дороги, особенно на краю области съемки, не самые удачные объекты для выбора контрольных точек, хотя первоначальное предположение о неизменности высоты их покрытия от

съемки к съемке было обнадеживающим. Отклонения высоты между 2016 и 2018 годами получились неправдоподобно большими (в среднем величина наблюдаемых отклонений более 2 метров). Оказалось также, что деревья, растущие вдоль дорог, и тень от них вносят искажения в вертикальную координату ПОТ. Поэтому такие точки для контроля высоты следует исключать (рис. 4А).

Рис. 1. Метаданные условий съемки участка южного берега Таганрогского залива в 2016, 2018 и 2019 гг. В легенде цветом указана степень перекрытия кадров

Таблица 1. Условия съемки южного берега Таганрогского залива в 2016, 2018 и 2019 гг.

Показатель	2016 г.	2018 г.	2019 г.
БПЛА	Phantom 3 Professional	Phantom 3 Professional	Phantom 3 Professional
Камера	FC 300X 1/2.3" CMOS, число эффективных пикселей:12,4 Мп	FC 300X 1/2.3" CMOS, число эффективных пикселей:12,4 Мп	FC 300X 1/2.3" CMOS, число эффективных пикселей:12,4 Мп
Высота полета, м	336	239	231
Сезон	15.07 и 26.07.2016 г.	06.08 и 07.08.2018	25.04 и 26. 04
Площадь покрытия, км 2	5.67	4.46	4.39
Разрешение, см/пиксель	13	8.82	8.61
Всего изображений	1077	736	768
Количество проекций	2392254	1609007	1224282
Число связывающих точек	225425	386962	237818
Степень перекрытия кадров	65 % продольное и 70 поперечное	65 % продольное и 70 поперечное	65 % продольное и 70 поперечное
Количество кадров на 1 км ²	190	165	175
Применяемое программное обеспечение (ПО) для обработки снимков	PhotoScan компании Agisoft	PhotoScan компании Agisoft	PhotoScan компании Agisoft
Среднее количество точек ПОТ на 1 м ²	3,83	32,4	33.7

Рис. 2. Расположение контрольных точек, которые использовались для:
(А – для минимизации расстояния между одинаковыми объектами в ОПТ 2016 и 2018 гг.
Б – проверки точности процедуры горизонтального смещения ОПТ относительно друг друга)

Рис. 3. Тестовый участок для отработки методики. (А – 2016 г. Б – 2018 г.)

Для набора точек, которые выделены на плоских участках (рис. 4Б), результаты получились более оптимистичными: 15 из 57 точек (25 %) имели абсолютное отклонение менее 0.3 м, 27 (50 %) – менее 0.5 м, 32 – менее 0.7 м, причем наблюда-

ются как положительные, так и отрицательные значения. Оставшиеся точки, скорее всего, снова попали на объекты строительства или растительности (у 19 точек наблюдаемые отклонения высоты более 1 м).

Рис. 4. Расположение точек для проверки «высотных» ошибок 3D-моделей, построенных по ПОТ.
(А – точки на дорожном полотне. Б – точки на различных участках, которые можно было считать относительно ровными).

Таким образом, для данной выборки не выявлено систематического сдвига в измерениях высот и была принята гипотеза, что облака точек откалиброваны по высоте. Тогда участки поверхности, где нет растительности, строительства и эрозии, должны совпадать. В предположении, что на самой береговой линии растительности мало и строения отсутствуют, измерениям на ней можно доверять и была выполнена численная оценка изменений рельефа на линии берега (рис. 5).

Линия обрыва вдоль берега моря проходит

в полосе $Y \in [90, 100]$, от 90 до 100 метров по ординате. Голубые и красные кружочки обозначают точки на краю обрыва береговой линии. Голубые относятся к 2018 году, красные – к 2016. Общая глубина обрыва составляет примерно 15 метров. Виден дрейф линии обрыва вглубь суши за эти два года на участках от 205 до 210 и от 215 до 220, на участке от 210 до 215 изменения практически нет, на участке от 200 до 204 проявляется, по-видимому, эффект накопления осыпавшегося сверху грунта (рис. 6).

Рис. 5 – Небольшой фрагмент тестового полигона размером 20 м по горизонтали (вдоль берега) и 100 м по вертикали (с юга на север, с суши на воду), для которого выполнено сравнение двух 3D-моделей, построенных на основе соответствующего ПОТ.

Рис. 6 – Сравнение вертикальных разрезов на фрагменте тестового участка

Построенные вертикальные разрезы (рис. 6) подтверждают, что по высоте имеется ошибка измерения: сдвиг облака точек в 2018 г. вверх по сравнению с 2016 г. на значительной части разрезов. Эту ошибку легко можно скорректировать, понизив все высоты в облаке 2018 года. Но более существенной для целей нашего исследования является ошибка в виде горизонтального сдвига облака 2018 г. относительно 2016 г. Этот сдвиг визуально хорошо виден

на рис. 7. Из профилей ясно, что нужно сдвинуть поверхность на карте 2018 года по оси Y вниз хотя бы на метр. Но, вполне возможно, что реальный сдвиг должен быть больше. А, кроме того, возможно, что нужно ещё сдвинуть облако 2018 г. вдоль оси X, а не только Y. Поскольку оценки сдвига линии обрыва должны ловить 1–2 метра, то ошибки в привязке реперных точек в ПОТ должны быть не хуже 0.5–1.0 метр, а этого добиться не удалось.

Рис. 7 – Фотографии с БПЛА, иллюстрирующие наличие ошибки горизонтальной привязки ПОТ 2016 и 2018 гг.

Рис. 8 – Фотографии склона тестового участка с БПЛА в 2016 г. (А) и результат программного устранения высоких объектов из ПОТ (Б)

Кроме обнаруженного горизонтального сдвига проявляется еще и артефакт в форме пилообразного изменения профиля в 2018 г. на участке от 218 до 220. В 2016 г. съемка берега проводилась не только в надир, но и со стороны моря. На тестовом участке хорошо видны, с одной стороны, слоистая структура

верхней части берегового обрыва, с другой – наличие дерева на его краю (рис. 8).

В первом случае пилообразный вид профиля может быть объяснен характером абразионного процесса, когда большой массив уже отделился от основного берега, но еще не обрушился. Во втором

случае – ошибками корректировки ПОТ за счет устранения высоких отдельно стоящих объектов (деревьев, столбов, зданий и т.д.).

В результате рассмотренных выше экспериментальных исследований сравнения двух 3D-моделей местности, построенных на основе ПОТ, для выявления значимых различий, обусловленных разрушением берега, были сформулированы дополнительные рабочие гипотезы (шаги), требующие решения.

1. Если проблема горизонтальной привязки разновременных ПОТ не будет решена с приемлемой точностью, то надеяться на получение хороших результатов при сравнении 3D-моделей местности, построенных на их основе, не приходится. Особенно, если требуется установить сдвиг берега в результате абразионных процессов на 1–2 м в год. Задача может быть решена с высокой точностью за счет расстановки на местности хорошо видимых с высоты 150 м маркеров с геодезической привязкой, но в этом случае теряется экономическая целесообразность применения БПЛА. Это возможно только на локальных участках т.н. аварийных берегов, с высокой скоростью абразии, при оползнях. Другой подход может быть связан с выделением на снимках одного года съемки реперных точек с последующим их поиском (распознаванием) на снимках другого года съемки и привязкой друг к другу с помощью программных средств, возможно используя алгоритмы машинного обучения.

2. Есть основания считать, что условия съемки (различия высот, сезона съемки и маршрута съемки) не должны сильно влиять на качество построения ПОТ и 3D-моделей местности на их основе. Эту гипотезу частично можно будет проверить путем сравнения съемки, сделанной в августе 2018 г.

и апреле 2019 г., когда высота съемки была примерно одинакова.

3. Так как нас интересует область в районе берегового обрыва, то можно сразу выделить некоторую полосу вдоль него. Положение обрыва можно оценить из других данных, например, актуального спутникового снимка высокого разрешения. Затем необходимо выбрать полосу от уреза воды в сторону суши шириной равной ширине пляжа плюс 50 м и далее работать только в пределах этой полосы. Данные за пределами этой полосы использовать как вспомогательные.

4. Можно выполнить статистический анализ данных из ПОТ, используя регулярную сетку разрешением, например, 1 м. Для оценки систематической ошибки высот по данным 2 съемок можно выбрать такие элементарные площадки, для которых: а) число точек максимальное и б) стандартное отклонение высот в которых минимально. При этом не надо будет выделять вручную эти точки, а выбирать, например, в полосе на суше, которая удалена от обрыва на 5–10 м. После выявления систематических различий можно будет выполнить корректировку по вертикали.

5. После этого можно будет вычитать одну трехмерную модель из другой, но уже с разрешением, например, 10 см и выявлять области, в которых различия максимальны, проводить через них вертикальные разрезы для анализа изменений.

6. Возможно, в дополнение к съемке территории в надир следует выполнять съемку берега со стороны моря для последующего контроля неясных моментов.

Исследования выполнено финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-05-80082.

ESTIMATES OF CHANGES IN THE RELIEF OF THE COASTAL ZONE DURING ABRASION USING REMOTE SENSING DATA: METHODOLOGICAL APPROACHES AND PRELIMINARY RESULTS

A.S. Travnikova¹, S.A. Misirov², S.V. Berdnikov², L.M. Mestetskiy¹

²Moscow state University, Moscow

¹Southern scientific center of RAS, Rostov-on-don

travnikova_arina@mail.ru, sam.misirov@gmail.com, berdnikovsv@yandex.ru, mestlm@mail.ru,

Abstract. The article offers a method for assessing changes in the relief of the Azov sea coastline and the localization of areas of erosion using discrete surface models obtained from remote sensing of the Earth using unmanned aerial vehicles (UAVs). This problem arises because of the need to monitor the dynamics of the coastline: due to the activation of various natural and man-made processes, there is an intensive destruction of the shores of the seas of Russia. Existing modern methods of land topographic survey do not allow you to quickly get information about changes in the state of the coastline or are expensive, and the large extent of the zone subject to erosion makes the traditional instrumental approach of measuring at reference points very labor-intensive. Also, the data obtained by the instrumental method reflects the problem point-by-point, rather than along the entire coastline. In this paper, we developed an algorithm and software for building a three-dimensional terrain model (using Delaunay triangulation) based on the so-called "dense point cloud" obtained when shooting terrain from an unmanned aerial vehicle (UAV). we proposed and programmatically implemented an algorithm for comparing (subtracting) two 3D models based on surveys performed by the same camera, but at different times of the day, in different seasons, and at different heights with an interval of 2 years, to identify significant changes in terrain in the area of the coastal slope, caused by abrasive and collapse processes. Experimental studies of the developed approach were conducted at the test site (500 by 300 m in size) on the southern shore of the Taganrog Bay. As a result of the considered experimental studies of comparing two 3D terrain models based on dense point clouds, additional working hypotheses (steps) that need to be solved were formulated to identify significant differences due to the destruction of the coast.

Keywords: Unmanned aerial vehicle, remote sensing, Taganrog Bay, coastal cliff, method for comparing three-dimensional terrain models, estimation of abrasion rates.