

В. Ф. Удовик

*Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь*

### **МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ПЛЯЖА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МОНИТОРИНГА БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ**

Представлена простая и эффективная методика, позволяющая одному наблюдателю оперативно проводить измерения профиля песчаных и галечниковых пляжей на любом участке береговой зоны без использования дорогостоящего и сложного оборудования. В основе предлагаемой методики, относящейся к классу тригонометрического нивелирования, лежит получение кусочно-линейной аппроксимации истинной кривой, соответствующей профилю поверхности пляжа, с использованием трехкомпонентного акселерометра. Вдоль поперечного створа производится серия измерений углов наклона поверхности пляжа на смежных отрезках, длина которых фиксируется в качестве базового расстояния для использования при обработке исходных данных. Приведены примеры использования показаний *G*-сенсора, встроенного в приборы массового производства, во время мониторинговых работ на побережье Западного Крыма. Описаны основные методические аспекты проведения измерений, обработки исходных данных и планово-высотной привязки профилей. Показано, что точность получаемых профилей пляжа соответствует требованиям, предъявляемым к результатам мониторинговых и рекогносцировочных работ. Представлена схема компоновки макетного образца электронного прибора для измерения профилей береговой зоны с использованием трехкомпонентного акселерометра, *GPS*-модуля и записью результатов на *SD*-карту.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *профиль пляжа, методика измерения, электронный измеритель профиля пляжа, мониторинг береговой зоны, акселерометр, GPS-модуль, SD-карта, GNSS-приемник, Западный Крым*

doi: 10.22449/2413-5577-2019-2-40-47

Рельеф пляжей является одним из основных индикаторов текущего состояния и тенденций развития аккумулятивных форм на исследуемом участке береговой зоны (БЗ) [1]. Существующие методики и рекомендации по проведению мониторинговых наблюдений для исследования литодинамических процессов в БЗ моря в качестве наиболее информативных характеристик выделяют повторные измерения профилей пляжа на опорных створах [2, 3].

Традиционными методами получения натуральных данных о планово-высотных отметках поверхности пляжей являются нивелирная или теодолитная съемка, производимые с использованием приборов различной конструкции и класса точности. В настоящее время для оперативного обследования протяженных участков БЗ активно и успешно применяются методы наземно-космической съемки с использованием *GNSS*-приемников геодезического класса. Использование методов фотограмметрической аэрофото-съемки и лазерного сканирования позволяет создавать цифровые модели рельефа для протяженных участков побережья. Внедрение и применение новых приборов и инновационных технологий существенно повышает опе-

© В. Ф. Удовик, 2019

*Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. вып.2. С.40-47.*

ративность и эффективность проведения мониторинговых исследований.

Однако все указанные способы инструментальных измерений морфометрических характеристик БЗ требуют подготовки квалифицированного персонала и закупки дорогостоящего оборудования, имеющего определенные ограничения по условиям эксплуатации. В связи с этим, в мировой практике исследований динамики БЗ параллельно существует направление по разработке и внедрению простых методик измерения профилей пляжа с использованием приборов и различного рода приспособлений, имеющих низкую стоимость.

Методики данного класса широко используются в практике научных исследований, а также в рамках реализации волонтерских и обучающих программ [4, 5] и должны удовлетворять следующим основным критериям:

- простота и высокая скорость проведения измерений с точностью, удовлетворяющей требованиям мониторинговых исследований;
- низкая стоимость используемого прибора и отсутствие ограничений по условиям его эксплуатации в БЗ;
- возможность при необходимости оперативно изготовить данное измерительное средство;
- минимальное количество наблюдателей для проведения измерений;
- минимальные требования к уровню подготовки персонала.

Основа данного направления заложена с появлением «метода Эмери», предложенного в 1961 г. [6]. Прибор представляет собой две градуированные вехи, соединенные поперечными планками. При измерении превышения на заданном расстоянии используется линия горизонта. Основным ограничением для «метода Эмери» является необходимость наличия видимого горизонта. Это исключает возможность использования данного метода в условиях ограниченной видимости, обусловленных рельефом пляжа или погодными условиями, а также на внутренних водоемах.

Разработанные в последующие годы методики основаны на общеизвестных принципах геометрического, тригонометрического или гидростатического нивелирования. Приборы в большинстве случаев представляют собой различного вида конструкции, состоящие из двух вех и соединяющих их планок, позволяющие при фиксированном расстоянии с определенной точностью измерить либо угол наклона поверхности пляжа, либо непосредственно разность высот в двух точках [7, 8]. Для определения превышений также используются сообщающиеся сосуды [9, 10] с измерением расстояния мерной лентой.

Цель настоящей статьи – представить описание разработанной автором методики, также позволяющей быстро и эффективно измерять профили пляжа при проведении мониторинговых и рекогносцировочных работ на любом участке береговой зоны морей и внутренних водоемов с использованием инновационных технологий.

**Практические аспекты мониторинга рельефа БЗ.** Первоначально необходимость использования простого и достаточно точного метода измерения профиля пляжа возникла в ходе проведения мониторинговых работ в береговой зоне Западного Крыма с использованием GNSS-приемников геодезического класса [11]. В тыловой части пляжа, примыкающей к подно-

жию высокого клифа, в большинстве случаев наблюдалось резкое падение точности измерения пространственных координат, получаемых с использованием спутниковых приемников. В частности, фиксированное решение, получаемое при проведении измерений приемником *EFT M1* в режиме *RTK* и отображающееся на экране контроллера, сигнализировало об увеличении ошибки определения высотных отметок до  $\pm 28 - 32$  см. Такой диапазон ошибок уже не соответствует точности измерения профиля, которая рекомендуется при проведении мониторинговых работ и обычно допускает погрешность по высоте в пределах  $\pm 5$  см.

Подобная ситуация четко описана в руководствах пользователю и в общем случае является стандартным ограничением для использования *GNSS*-приемников. Резкое возрастание ошибки вызвано в первую очередь отсутствием возможности приема сигналов от части спутниковой группировки, располагающейся на момент наблюдений в полусфере со стороны клифа, и приемом переотраженного сигнала.

Аналогичные проблемы, связанные со снижением точности определения координат с помощью *GNSS*-систем в условиях слабого либо переотраженного сигнала, возникают при проведении работ в различных областях хозяйственной деятельности. Во многих специализированных исследованиях рассматриваются пути решения проблемы снижения точности определения координат в условиях переотраженного сигнала. Однако, на основе анализа опыта полевых работ авторы большинства публикаций дают рекомендацию о необходимости просто выполнять требования к условиям эксплуатации приборов для получения заявленной точности измерений, т.е. просто избегать ситуации многолучевости распространения радиоволн при измерении деформаций земной поверхности [12].

Данные рекомендации практически невозможно реализовать при проведении наблюдений в береговой зоне, где априори переотражение сигнала возможно как от водной поверхности, так и от высоких клифов, которые могут также приводить к потере связи с частью группировки спутников.

В связи с этим, для минимизации больших ошибок, обусловленных неблагоприятными условиями эксплуатации *GNSS*-приемников, автором была предложена методика дополнения измеряемого профиля в тыловой части пляжа с использованием показаний датчиков акселерометров (*G*-сенсоров), встроенных в смартфоны и планшеты массового производства.

**Методика измерения профиля пляжа.** В основе методики лежит получение кусочно-линейной аппроксимации истиной кривой, соответствующей профилю поверхности пляжа. На поперечном створе производятся измерения углов наклона поверхности пляжа на смежных отрезках, длина которых фиксируется в качестве базового расстояния для использования при обработке исходных данных. Таким образом, предлагаемая методика относится к классу известных способов тригонометрического нивелирования.

Наиболее близкой по технике измерения можно считать методику, представленную в [13]. Согласно приводимому описанию, по профилю пляжа производится перемещение платформы с установленным на ней акселерометром и производится автоматическая запись результатов измерений. Однако в данном приборе линейные расстояния не измеряются напря-

мую, а рассчитываются как пройденный путь по координатам смежных точек, полученных с использованием высокоточного GNSS-приемника. Данный факт приводит к существенному увеличению стоимости и сложности прибора, что не соответствует указанным выше требованиям для измерителей рассматриваемого типа.

Отработка предлагаемой методики и ее использование в полевых условиях проводились в рамках мониторинговых работ, осуществляемых Морским гидрофизическим институтом РАН и Черноморским гидрофизическим полигоном РАН в береговой зоне Западного Крыма и Южного берега Крыма. Для фиксации угломерного устройства на участках поверхности с постоянным уклоном и измерения длины данных отрезков использовалась жесткая планка длиной 1 м либо мерный шест длиной 2 м. Планка была оборудована мерной лентой, позволяющей измерять расстояния менее 1 м при сложном распределении высотных отметок на профиле.

Для измерения углов наклона поверхности по отношению к горизонтали использовались показания трехкомпонентного акселерометра, встроенного в смартфон. Визуализация показаний  $G$ -сенсора производилась с использованием приложения с открытым доступом *Smart Protractor*.

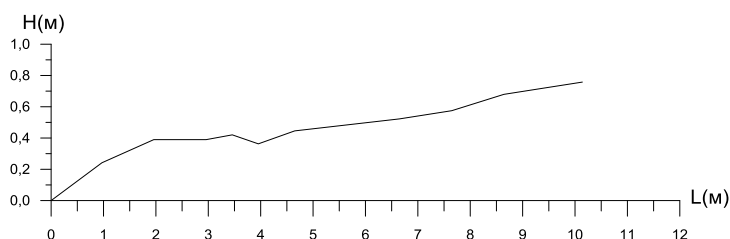
На этапе обработки результатов измерений используются известные формулы для расчета длин катетов прямоугольного треугольника по заданным значениям длины гипотенузы и внутренних углов. Разработана компьютерная программа, осуществляющая ввод, корректировку и обработку исходных данных. Поправки для корректировки показаний  $G$ -сенсора смартфона в различных диапазонах угла наклона определялись посредством их сравнения с синхронными отсчетами по вертикальному кругу оптического теодолита 2Т30П. После обработки результатов осуществляется вывод величин расстояния от начала профиля пляжа до каждой из точек стыковки смежных отрезков аппроксимации и соответствующие им значения высотных отметок (табл.1), и формируется файл данных в формате, удобном для построения профиля в графических пакетах (рис.1).

Тестирование методики проводилось путем сравнения серии получаемых результатов с данными прямых измерений спутниковым приемником *EFT M1* на открытых участках местности и нивелирной съемки теодолитом 2Т30П. Абсолютные отклонения значений линейных координат не превыша-

Т а б л и ц а 1. Данные измерений и результаты расчета плано-высотных отметок профиля пляжа относительно «нуля» на линии уреза воды.

данные измерений												
$R, м$	–	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,7	2,0	1,0	1,0	0,5	1,0
$F, °$	–	14,0	8,5	0,0	3,5	–6,6	6,8	2,2	3,0	6,0	3,0	3,0
результаты расчета												
$L, м$	0,0	0,97	1,96	2,96	3,46	3,95	4,65	6,65	7,65	8,64	9,14	10,15
$H, м$	0,0	0,24	0,39	0,39	0,42	0,37	0,45	0,52	0,57	0,68	0,71	0,76

Примечание:  $R$  – длина базы,  $F$  – угол наклона после корректировки,  $L$  – расстояние от начала профиля,  $H$  – высота над «нулем» профиля.



Р и с . 1 . Профиль пляжа, построенный по результатам измерений.

ли 5 – 8 см даже при длине профиля, достигающей 60 м. Таким образом, методика удовлетворяет точности измерений, требующейся при проведении мониторинговых работ.

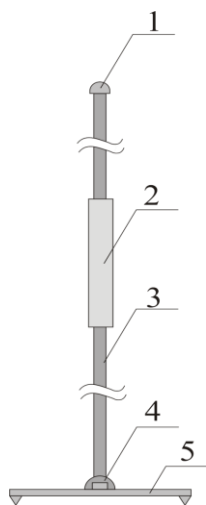
Анализ структуры ошибки измерения показал, что основной вклад дают две составляющие: установка планки на поверхности пляжа и непосредственно измерение угла наклона акселерометром. Во всех тестах суммарная ошибка измерения вертикального угла на одном отрезке аппроксимации составляла не более  $1^\circ$ . Соответственно при длине базы 1 м возможные отклонения по высоте составляют не более 1 см. Данные отклонения можно отнести к категории случайных, т.е. не приводящих к значительному накоплению ошибок при увеличении длины профиля.

Высотные отметки на получаемых профилях пляжа отсчитываются от «нуля» каждого профиля, соответствующего его началу. В связи с этим при использовании данной методики следует придерживаться стандартных правил проведения измерений. На створах, оборудованных стационарными или временными реперными знаками, измерение профиля следует проводить от точки с известной высотной отметкой по направлению к урезу воды. При проведении измерений на маршруте либо во время рекогносцировочных работ, т.е. когда отсутствует возможность осуществить точную высотную привязку начала профиля, наиболее целесообразно первую установку измерительной планки на створе располагать от линии уреза воды. В этом случае введение поправки за уровень при обработке данных позволит производить сравнение профилей, измеренных в различные периоды времени.

#### **Прибор для оперативного измерения профиля поверхности пляжа.**

В обобщенной формулировке предлагаемый выше способ проведения измерений профиля предполагает последовательную перестановку по измеряемой поверхности жесткой планки известной длины с установленным на ней электронным измерителем угла наклона и записью результатов измерений. В качестве дополнительной функции производится фиксация плановых географических координат точек измерения на концах профиля.

Опыт использования данной методики показал с одной стороны ее работоспособность в описанном выше варианте, с другой стороны – настоятельную необходимость объединения всех указанных функций в одном приборе. В связи с этим автором инициировано и осуществлено изготовление действующего макетного образца электронного прибора для оперативного измерения профилей рельефа береговой зоны и предложена базовая схема комплектации узлов данного аппаратно-программного комплекса (рис.2).



Р и с . 2 . Предлагаемая базовая схема компоновки прибора для измерения профиля пляжа с фиксацией координат створа и записью результатов измерений (1 – *GPS*-модуль, 2 – приборный блок, 3 – монопод, 4 – подвижное соединение, 5 – планка с закрепленным акселерометром).

Конструктивно прибор представляет собой монопод переменного сечения длиной около 2 м. В его центральной части, имеющей наибольший диаметр, встроен съемный блок специальной конструкции, содержащий батарею аккумуляторов, электронный блок обработки сигналов датчиков, модуль записи на *SD*-карту и панель управления.

На нижнем конце монопода имеет подвижное сочленение с жесткой планкой, устанавливаемой непосредственно на измеряемую поверхность. На подвижной планке длиной 1 м размещен модуль акселерометра и нанесена шкала, позволяющая измерять расстояния менее 1 м при сложном распределении высотных отметок на профиле. Блок с *GPS*-модулем установлен на верхнем конце монопода с целью минимизации помех при приеме спутниковых сигналов, которые в том числе может создавать непосредственно наблюдатель. Для удобства хранения и транспортировки прибора конструктивно предусмотрена возможность отсоединения верхней и нижней секций монопода от приборного блока.

В данной концепции прибора основным датчиком является акселерометр. В связи с этим используемый модуль обладает достаточно высокими характеристиками точности и стабильности измерений. Перед установкой в прибор он прошел процедуру калибровки для определения возможных ошибок в различных интервалах измерения углов. Соответственно в программное обеспечение была включена процедура компенсации ошибок измерения вертикальных углов перед проведением расчетов профиля.

*GPS*-модуль выступает в качестве вспомогательного устройства. Стремление увеличить точность позиционирования может привести к существенному удорожанию прибора и является нецелесообразным. Получаемые координаты, учитывая невысокие требования к точности их измерения, предназначены преимущественно для упрощения следующих процедур, осуществляемых при обработке и анализе данных мониторинговых наблюдений:

- идентификация отдельных профилей при формировании непрерывной записи результатов измерений после включения прибора;
- определение либо уточнение пространственного положения отдельных створов на топографических картах и схемах;
- включение результатов измерения профилей пляжа в ГИС.

Запись результатов измерений на *SD*-карту позволяет исключить возможность появления ошибок, связанных с различными причинами субъективного характера.

**Выводы:** – представлена простая и эффективная методика, позволяющая одному наблюдателю оперативно проводить измерения профиля песчаных и галечниковых пляжей на любом участке береговой зоны без использования дорогостоящего и сложного оборудования;

– методика отличается простотой и финансовой доступностью в связи с массовым внедрением портативных приборов со встроенными *G*-сенсорами для измерения вертикальных углов;

– после калибровки используемого датчика акселерометра точность получаемых результатов сопоставима с измерениями, произведенными в полевых условиях с использованием геодезического оборудования либо комплекта *GNSS* -приемников геодезического класса;

– методика функциональна для измерения всего профиля и дополнения профилей на участках створа, где происходит значительное снижение точности измерений с использованием *GNSS*-приемников;

– предлагаемая базовая схема компоновки прибора позволяет реализовать в одном аппаратно-программном комплексе все основные функции, необходимые для проведения оперативного мониторинга рельефа береговой зоны и решения аналогичных задач в различных отраслях строительства и разработки природных ресурсов;

– портативность и легкость транспортировки на маршруте делают представляемый электронный измеритель профиля перспективным для массового использования при проведении мониторинговых работ, в том числе в активно осваиваемых районах арктических морей, рек и водоемов.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме №0827-2018-0004 и частично по теме №075-00803-19-01

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зенкович В.П.* Основы учения о развитии морских берегов.– М.: Наука, 1962.– 710 с.
2. *Руководство по методам исследований и расчетов перемещения наносов и динамики берегов при инженерных изысканиях.*– М.: Гидрометеиздат, 1975.– 240 с.
3. *Parson L.E.* Beach and near-shore survey technology.– Coastal Engineering Technical Note, U.S. Army Engineers Waterways and Experiment Station.– CENT II-38 (6/97).– 10 p.
4. *O'Connell J.* Beach and dune profiles: an educational tool for observing and comparing dynamic coastal environments.– WHOI Sea Grant WHOI-G-01-001, Marine Extension Bulletin, 2001.– 6 p.
5. *Exploring Florida: Teaching Resources for Science* [Электронный ресурс].– URL: <http://fcit.usf.edu/Florida/teacher/science/mod2/beach.profiles.html> (дата обращения 15.03.2019).
6. *Emery K.O.* A simple method of measuring beach profiles. // *Limnology and Oceanography.*– 1961.– № 6.– P.90-93.
7. *Delgado I., Lloyd G.* A simple low cost method for one person beach profiling // *J. Coast. Res.*– 2004.– v.20, iss.4.– P.1246-1252.
8. *Puleo J.A., Pearre N.S., He L., Schmied L., O'Neal M., Pietro L S., Fowler M.* A Single-user subaerial beach profiler // *J. Coast. Res.*– 2008.– v.24, iss.4.– P.1080-1086.
9. *Chowdhury S.R., Shahadat M.H., Sharifuzzaman Sm.* A simple and inexpensive method for muddy shore profiling // *Chinese Journal of Oceanology and Limnology.*– 2014.– № 32(6).– P.1383-1391.

10. *Andrade F., Ferreira M. A.* A simple method of measuring beach profiles // *J. Coast. Res.*– 2006.– v.22, iss.4.– P.995-999,
11. *Долотов В.В., Удовик В.Ф.* Опыт использования инновационных технологий для мониторинга прибрежной зоны Крыма // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.*– 2017.– вып.4.– С.67-77.
12. *Нестеренко М.Ю., Цвяк А.В.* Оценка возможности и точности применения gnss-систем для мониторинга деформаций земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов // *Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН.*– 2016.– 4.– 7 с. [Электронный ресурс].– URL: <http://elmag.uran.m:9673/magazine/Numbers/2016-4/Artides/MYN-2016-4.pdf>
13. *Gutiérrez J., Gómez-Muñoz V., Villa-Medina F., Porta-Gándara M. Á* Wireless beach profiler // *J. Coast. Res.*– 2012.– v.28, iss.4.– P.868-873.

Материал поступил в редакцию 18.03.2019 г.

V.F.Udovik

#### METHOD OF BEACH PROFILES MEASUREMENT DURING THE COASTAL ZONE MONITORING

The simple and effective method is given when one observer is allowed to quickly measure the sandy and pebbly beach profiles on any part of the coastal zone without using expensive and sophisticated equipment. The basis of the proposed technique, belonging to the class of trigonometric leveling, is obtaining a piecewise linear approximation (PLA) of the true curve corresponding to the beach surface profile using a three-component accelerometer. A set of measurements of the angle of inclination of a beach surface on adjacent segments, the length of which is recorded as the base distance for use in the processing of the initial data, is made along the transverse section. Examples of the use of the G-sensor readings embedded in mass production devices during the monitoring works on the coast of the Western Crimea are given. The main methodological aspects of measuring, processing initial data and plan-height attachment of profiles are described. It is shown that the accuracy of the obtained beach profiles meets the requirements of the results of monitoring and reconnaissance work. The layout of the prototype electronic device for measuring coastal zone profiles using a three-component accelerometer, a GPS module and recording the results on an SD card is presented.

**KEYWORDS:** beach profile, measurement method, electronic beach profile meter, coastal zone monitoring, accelerometer, GPS module, SD card, GNSS receiver, Western Crimea