

## Опыт применения спутниковых радиомаяков для наблюдений ледников в Арктике

С. В. Мотыжев<sup>1,\*</sup>, А. П. Толстошеев<sup>1</sup>, Е. Г. Лунев<sup>1</sup>, А. Л. Сальман<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

<sup>2</sup>ООО «ЭС-ПАС», Москва, Россия

\*E-mail: smotyzhev@mail.ru

Поступила в редакцию 24.11.2017 г.

Рассмотрены конструктивные и эксплуатационные особенности спутниковых радиомаяков *iceST/40-Glacier*, которые были разработаны в Морском гидрофизическом институте РАН и изготовлены ООО «Марлин-Юг». Радиомаяки предназначены для мониторинга движений ледников. Характеристики движения рассчитываются по координатам радиомаяка, измеренным встроенным приемником системы глобального позиционирования *GPS* и поступающим пользователям по каналам связи спутниковой системы сбора данных и определения координат платформ *Argos-2*. Конструкция радиомаяка делает возможным его простую установку на ледник. В радиомаяке реализован специально разработанный алгоритм измерений, который при использовании недорогого приемника *GPS* обеспечивает с вероятностью 95 % погрешность в пересчете на дистанцию не более 1,7 м. Измерения выполняются один раз в неделю. Время автономной работы радиомаяка – не менее 24 мес. По результатам статистического анализа долговременных натурных экспериментов на ледниках арктических архипелагов делается вывод о возможности и целесообразности построения на базе радиомаяков *iceST/40-Glacier* надежной, технологичной и экономной сети систематического мониторинга движений ледников. Информация, получаемая с помощью такой сети, позволит повысить безопасность судоходства в окраинных морях Северного Ледовитого океана и может быть использована для верификации спутниковых данных.

**Ключевые слова:** спутниковый радиомаяк, измерение координат, движение ледника, арктические наблюдения.

**Для цитирования:** Опыт применения спутниковых радиомаяков для наблюдений ледников в Арктике / С. В. Мотыжев [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 2. С. 165–174. doi:10.22449/0233-7584-2018-2-165-174

## Experience of satellite trackers' application for watching glaciers in the Arctic

S. V. Motyzhev<sup>1,\*</sup>, A. P. Tolstosheev<sup>1</sup>, E. G. Lunev<sup>1</sup>, A. L. Salman<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

<sup>2</sup>ES-PAS Ltd, Moscow, Russia

\*e-mail: smotyzhev@mail.ru

The engineering and operational features of the satellite trackers *iceST/40-Glacier* developed in the Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, and produced by Marlin-Yug Ltd are considered. The trackers are developed to monitor the glaciers' movements. The glaciers' motion characteristics are calculated using the tracker coordinates measured by the satellite GPS receiver and distributed among the users due to the worldwide location and data collection system *Argos-2*. The satellite tracker construction is simple enough to place it on a glacier. It represents a specially developed measurement algorithm that permits, first, to apply a standard low-cost GPS receiver and, second, to define location with accuracy not exceeding 1.7 m. The measurements required to determine location are done once a week. The tracker lifetime is not less than 24 months. Statistical analysis of the long-term field experiments carried out on the Arctic archipelagos' glaciers results in drawing a conclusion that, the *iceST/40-Glacier* satellite trackers, being used as a basis, make creation of reliable, technological and low-cost network for regular monitoring the glaciers' movements possible and expedient. The information obtained due to such a network permits to increase navigation safety in the Arctic Ocean marginal seas and can be used for verifying remote sensing data.

**Keywords:** satellite tracker, determination of position, glacier movement, Arctic observations.

**For citation:** Motyzhev, S.V., Tolstosheev A.P., Lunev, E.G. and Salman, A.L., 2018. Experience of satellite trackers' application for watching glaciers in the Arctic. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, 34(2), pp. 165-174. doi:10.22449/0233-7584-2018-2-165-174 (in Russian).

© Мотыжев С.В., Толстошеев А.П., Лунев Е.Г., Сальман А.Л., 2018

**Введение.** Хозяйственная деятельность в полярных регионах так или иначе связана с эволюцией ледниковых образований. Общая площадь оледенения островов Арктической зоны Российской Федерации составляет более 56000 кв. км [1]. Ледники покрывают от 30 до 45% территорий архипелагов Новая Земля и Северная Земля, от 57 до 90% – архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа. Адекватность представлений о движении ледников имеет решающее значение при принятии управленческих решений по охране окружающей среды, корректировании действующих и обосновании будущих хозяйственных проектов. Напрямую связана с достоверностью информации о движении покровных ледников, продуцирующих айсберги, безопасность судоходства в окраинных морях Северного Ледовитого океана [2]. Актуальность задачи мониторинга ледников очевидна, а ее решение невозможно без создания устойчивой системы комплексных наблюдений, объединяющей современные технологии мониторинга. Разумеется, основным компонентом такой системы являются дистанционные методы (радиолокационные, оптические и др.) [3–5]. Современные алгоритмы обработки спутниковых данных, используемые для гляциологических исследований, обеспечивают восстановление параметров движения ледников с геометрическим разрешением 10–15 м [5, 6]. Однако с учетом малых скоростей движения ледников (от нескольких метров до сотен метров в год) такое разрешение позволяет диагностировать либо их кратковременные аномально высокие подвижки, либо небольшие смещения в течение длительного времени. Достоверность результатов дистанционного мониторинга определяется возможностями верификации спутниковых данных [7, 8]. Отсутствие корректной сети подспутниковых контрольно-калибровочных измерений является объективным тормозом в развитии методов космической гляциологии. Кроме того, систематичность поступления спутниковых данных во многом зависит от погодных условий.

Задача оперативного мониторинга динамики ледников решается путем полевых наблюдений и наблюдений с помощью систем глобального позиционирования. Получаемые таким образом данные используются также для верификации спутниковых измерений. Метод восстановления параметров движения ледника по данным координатных измерений установленного на нем приемника системы глобального позиционирования *GPS* давно применяется в практике гляциологии [9, 10]. При погрешностях, соизмеримых с погрешностями полевых наблюдений, метод позволяет автоматизировать процесс получения данных, а применение современных средств спутниковой связи обеспечивает оперативную доставку информации пользователям.

В настоящей работе рассматривается один из вариантов реализации указанного метода – спутниковый радиомаяк *iceST/40-Glacier*, разработанный в Морском гидрофизическом институте (МГИ) РАН. Радиомаяки производятся российской фирмой ООО «Марлин-Юг» [11]. Необходимость такой разработки объясняется тем, что, несмотря на широкую, судя по публикациям, номенклатуру измерителей, отечественная гляциология не располагает средством мониторинга с приемлемыми эксплуатационными характеристиками, обеспечивающими сочетание высокой точности измерений координат и оперативности доставки данных пользователям с долговременной автономной работоспособностью, устойчивостью к воздействию влияющих факторов,

характерных для полярных регионов, простой технологией развертывания, низкой стоимостью. Анализируя современное состояние проблемы, авторы [12] отмечают, что «объем наземных наблюдений значительно сократился, и они не дают полноценной информации о колебаниях ледников» (с. 365).

**Принципы построения и алгоритм работы спутникового радиомаяка *iceST/40-Glacier*.** В МГИ на протяжении последних полутора десятилетий успешно развиваются дрейфтерные средства наблюдений окружающей среды, которые отвечают всем перечисленным выше требованиям. Технология создания таких средств была взята за основу при разработке радиомаяка *iceST/40-Glacier*. Для измерения координат радиомаяка используется встроенный приемник *UP501 (Fastrax)* (URL: <http://www.anglia.com/fastrax/datasheets/UP501.pdf> (дата обращения: 20.09.2017)) системы глобального позиционирования *GPS*. Выбор приемника основан на многолетнем опыте разработки и эксплуатации автономных платформ сбора данных и объясняется приемлемым сочетанием таких его характеристик, как погрешность позиционирования, энергопотребление и стоимость. Результаты измерений передаются по каналам связи спутниковой системы сбора данных и определения координат платформ *Argos-2* [13]. При алгоритме измерений и передачи данных, описание которого приведено ниже, емкость элементов электропитания радиомаяка обеспечивает его работоспособность в течение не менее 24 мес.

Для оценивания реальной погрешности измерений координат, определяющего показателя назначения радиомаяка, в процессе разработки были выполнены испытания приемника *UP501*, в которых исследовались статистические оценки результатов измерений координат стационарно установленного приемника. Использовались долговременные, длительностью до 24 ч, ряды координат с частотой 1 Гц. По результатам испытаний был разработан следующий алгоритм обработки и передачи данных, минимизирующий погрешность оценивания координат с учетом ограничений по энергопотреблению и пропускной способности канала спутниковой связи:

– каждое воскресенье в 01 ч 00 мин радиомаяк автоматически переходит из дежурного режима в рабочий, который продолжается до 22 ч 00 мин. В этом режиме выполняются измерения, обработка и передача данных;

– с 01 ч 00 мин до 19 ч 00 мин приемник *GPS* измеряет с частотой 1 Гц горизонтальные координаты радиомаяка. Результаты измерений фильтруются в блоке обработки данных. Для фильтрации используются служебные параметры *NS* и *HDOP*, которыми сопровождается каждый результат измерений: *NS* – количество спутников в «зоне видимости» приемника; *HDOP* – значение показателя точности определения горизонтального положения. В результате фильтрации для последующей обработки используются только те отсчеты координат, для которых  $NS > 4$  и  $HDOP < 2$ ;

– на каждом  $k$ -м интервале измерений длительностью 5 мин по отсчетам координат, удовлетворяющим указанным условиям, рассчитываются медианные значения широты  $(\varphi_{Me})_k$  и долготы  $(\lambda_{Me})_k$ , которые сохраняются во внутренней памяти радиомаяка и в течение следующих 5 мин с интервалом  $(90 \pm 9)$  с передаются по каналу связи спутниковой системы *Argos-2*. Здесь

$k = 1 \dots 215$  – порядковый номер каждого 5-минутного интервала в период 01 ч 00 мин – 19 ч 00 мин;

– во внутренней памяти радиомаяка также сохраняются отсчеты широты  $(\varphi_{NS_m})_k$  и долготы  $(\lambda_{NS_m})_k$ , полученные при наибольших за каждые 5 мин значениях  $NS$ ;

– в 19 ч 00 мин рассчитываются среднесуточные координаты по всем медианным значениям –  $\langle \varphi_{Me} \rangle = \frac{1}{215} \sum_{k=1}^{215} (\varphi_{Me})_k$ ,  $\langle \lambda_{Me} \rangle = \frac{1}{215} \sum_{k=1}^{215} (\lambda_{Me})_k$  и по всем от-

счетам при наибольших значениях параметра  $NS$  –  $\langle \varphi_{NS_m} \rangle = \frac{1}{215} \sum_{k=1}^{215} (\varphi_{NS_m})_k$ ,

$\langle \lambda_{NS_m} \rangle = \frac{1}{215} \sum_{k=1}^{215} (\lambda_{NS_m})_k$ , а также измеряются температура корпуса радиомаяка и напряжение электропитания;

– с 19 ч 01 мин до 22 ч 00 мин по каналу связи *Argos-2* с интервалом  $(90 \pm 9)$  с передаются среднесуточные координаты  $(\langle \varphi_{Me} \rangle, \langle \lambda_{Me} \rangle)$ ,  $(\langle \varphi_{NS_m} \rangle, \langle \lambda_{NS_m} \rangle)$  и измеренные значения температуры корпуса радиомаяка и напряжения электропитания.

Количественно оценить эффективность такого алгоритма первичной обработки и передачи данных в реальных условиях эксплуатации позволяют результаты координатных измерений радиомаяка *ID137954*. Радиомаяк был установлен на окруженном льдом скалистом пике, нунатаке, на одном из островов Арктической зоны Российской Федерации. Общая продолжительность работы радиомаяка по состоянию на 21 мая 2017 г. составила 743 сут. За этот период было получено 106 еженедельных блоков данных, что позволяет статистически значимо оценить характеристики погрешности измерений координат и качество передачи информации по каналу спутниковой связи.

**Оценки погрешности измерений координат.** В качестве характеристик погрешности измерений координат радиомаяка *ID137954* рассчитывались:

1) распределение отклонений между местоположениями со среднесуточными координатами  $(\langle \varphi_{Me} \rangle_w, \langle \lambda_{Me} \rangle_w)$  и местоположением со средними за

весь период наблюдений координатами  $\varphi_r = \frac{1}{N} \sum_{w=1}^N \langle \varphi_{Me} \rangle_w$

и  $\lambda_r = \frac{1}{N} \sum_{w=1}^N \langle \lambda_{Me} \rangle_w$ . Здесь  $w$  – порядковый номер еженедельного наблюдения;  $N$  – общее количество еженедельных наблюдений. Для радиомаяка *ID137954*  $N = 106$ . Отклонения пересчитывались в единицы дистанции как расстояния между двумя точками на сфере радиусом 6371 км (средний радиус Земли);

2) радиус окружности *CEP*, в которую попадают 50% локаций:

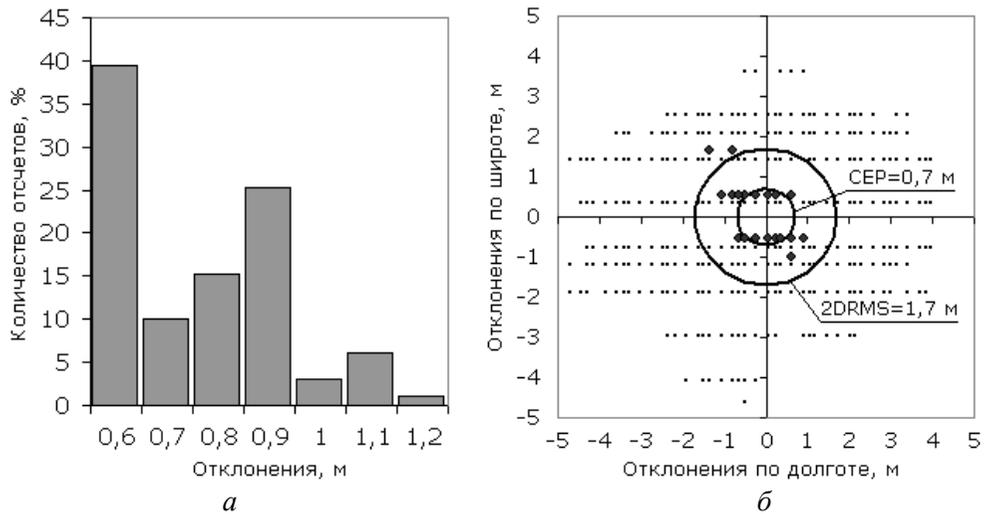
$$CEP = 0,59(\sigma_\varphi + \sigma_\lambda) \pm 3\%$$

где  $\sigma_\varphi, \sigma_\lambda$  – средние квадратические отклонения среднесуточных координат ( $\langle \varphi_{Me} \rangle_w, \langle \lambda_{Me} \rangle_w$ ) соответственно;

3) радиус окружности  $2DRMS$ , в которую попадают 95% локаций:

$$2DRMS = 2\sqrt{\sigma_\varphi^2 + \sigma_\lambda^2}.$$

Результаты оценивания показаны на рис. 1. Из распределения отклонений (рис. 1, а) видно, что в 93% отсчетов местоположение радиомаяка определялось с погрешностью не более 1 м. На рис. 1, б приведены отклонения местоположений с координатами  $[(\varphi_{Me})_k, (\lambda_{Me})_k]_w$  и  $(\langle \varphi_{Me} \rangle_w, \langle \lambda_{Me} \rangle_w)$  от позиции с координатами  $(\varphi_r, \lambda_r)$ . На том же рисунке показаны окружности, в которые попадают 50% ( $CEP = 0,7$  м) и 95% ( $2DRMS = 1,7$  м) локаций с координатами  $(\langle \varphi_{Me} \rangle_w, \langle \lambda_{Me} \rangle_w)$ . Оценки  $CEP$  и  $2DRMS$  взаимосвязаны и основаны на предположении о нормальности распределения погрешности [14, 15], что не всегда соответствует действительности. Тем не менее эти оценки широко используются в качестве показателей применения навигационного оборудования, и здесь они приводятся для удобства сопоставления, а наиболее информативным из полученных показателей точности позиционирования следует считать распределение отклонений (рис. 1, а).

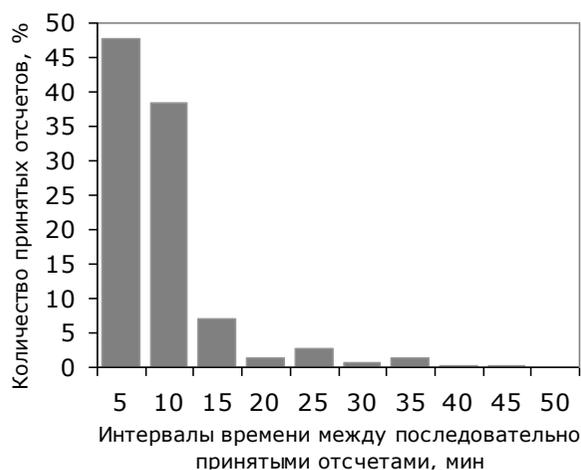


**Рис. 1.** Распределение отклонений между позициями радиомаяка, рассчитанными по среднесуточным координатам, и позицией, рассчитанной по координатам, осредненным за весь период наблюдений, – а; отклонения медианных, рассчитанных по данным каждого 5-минутного интервала измерений (точки черного цвета), и среднесуточных (жирные точки черного цвета) значений широты и долготы от позиции, рассчитанной по координатам, осредненным за весь период наблюдений, – б

**Fig. 1.** Distributions of deviations between the satellite tracker positions calculated by mean daily coordinates, and a position calculated from the coordinates averaged over the entire observation period – а; deviations of medians calculated by the data of each 5-minute measurement interval (black points), and mean daily (bold black points) values of latitude and longitude from the position calculated from the coordinates averaged over the entire observation period – б

**Оценки качества передачи информации по каналу спутниковой связи.** Важнейшей характеристикой радиомаяка как средства оперативного мониторинга является качество передачи собранных данных пользователям. Телеметрия радиомаяков *iceST/40-Glacier* обеспечивается в рамках спутниковой системы *Argos-2*. По ряду причин, в частности из-за ограниченного количества спутников, поддерживающих систему, не весь объем переданной информации становится доступным пользователям. О количестве пропущенных данных можно судить по гистограмме распределения интервалов времени между принятыми отсчетами медианных значений координат  $[(\varphi_{Me})_k, (\lambda_{Me})_k]$  радиомаяка *ID137954* (рис. 2), которые, как указывалось выше, передаются с интервалом 5 мин. Из графика видно, что с номинальным интервалом пользователю поступило менее 50% сообщений. Всего за 743 сут работы радиомаяка было потеряно ~30% таких отсчетов. При этом среднесуточные координаты  $(\langle \varphi_{Me} \rangle_w, \langle \lambda_{Me} \rangle_w)$ , которые рассчитываются в блоке обработки данных радиомаяка по всем значениям  $[(\varphi_{Me})_k, (\lambda_{Me})_k]$  и передаются в период 19 ч 00 мин – 22 ч 00 мин, были получены в полном объеме – 106 еженедельных отсчетов за 743 сут. Таким образом, благодаря применению рассмотренного выше алгоритма пропуска информации не привели ни к потере данных о местоположении радиомаяка, ни к увеличению погрешности позиционирования.

Возможной оказалась и другая ситуация. Так, например, в данных радиомаяка *ID137942* от 14.08.2016 г. отсутствовали (не были получены пользователем) средние за эти сутки значения координат, а восстановить местоположение, хотя и с несколько большей погрешностью, удалось по 5-минутным медианным отсчетам.



**Рис. 2.** Распределение интервалов времени между принятыми отсчетами медианных значений координат радиомаяка *ID137954*, рассчитанных по каждому 5-минутному интервалу измерений

**Fig. 2.** Distribution of time intervals between the received samples of the median values of *ID137954* satellite tracker coordinates calculated by each 5-minute measurement interval

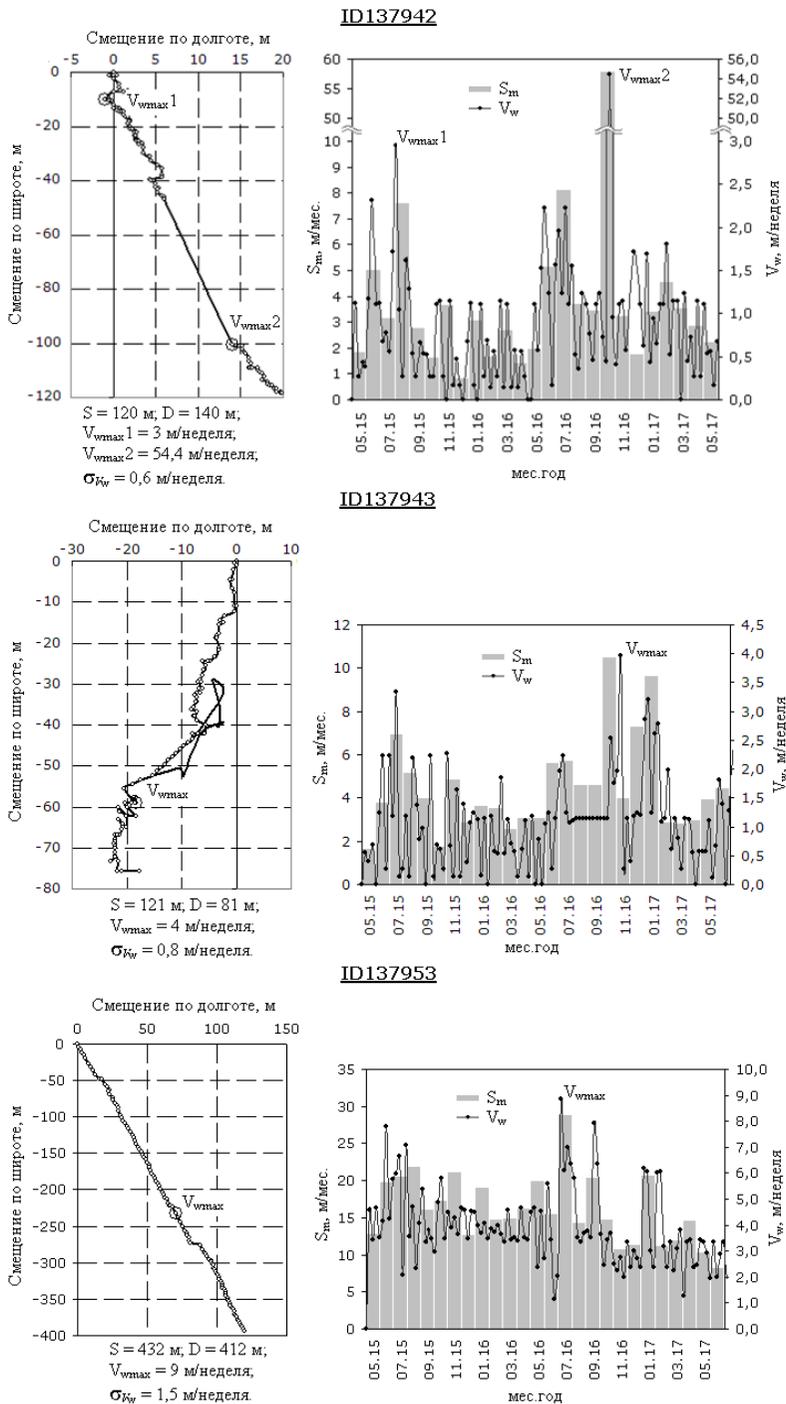
**Результаты натуральных экспериментов.** Начиная с мая 2015 г. радиомаяки *iceST/40-Glacier* используются для мониторинга покровных ледников на архипелагах Арктической зоны Российской Федерации. В течение двух последующих лет наблюдательная сеть поддерживалась 12 радиомаяками, продолжительность работы четырех из них по состоянию на июнь 2017 г. превысила 2 года. Далее рассматриваются некоторые результаты мониторинга, полученные в этот период.

На рис. 3 слева показаны траектории ледников, рассчитанные по еженедельным среднесуточным координатам ( $\langle \varphi_{Me} \rangle_w, \langle \lambda_{Me} \rangle_w$ ) радиомаяков *ID137942*, *ID137943*, *ID137953*. Графики построены в единицах пути и показывают смещения радиомаяков относительно точек их установки. Маркерами на траекториях отмечены местоположения, рассчитанные по еженедельным среднесуточным координатам. Положительные отклонения по осям ординат соответствуют направлению на север, отрицательные – на юг; по осям абсцисс: положительные – на восток, отрицательные – на запад. Там же для каждого радиомаяка приведены: рассчитанные по данным за период 10 мая 2015 г. – 4 июня 2017 г. пройденный путь  $S$  и дистанция  $D$ , на которую сместился радиомаяк; наибольшая скорость движения  $V_{wmax}$ ; флуктуации  $\sigma_{V_w}$  еженедельных значений скорости.

На рис. 3 справа столбиковыми диаграммами показаны временные ряды ежемесячных пройденных радиомаяками расстояний  $S_m$ , линейчатыми – скорости движения  $V_w$ , рассчитанные по еженедельным среднесуточным координатам ( $\langle \varphi_{Me} \rangle_w, \langle \lambda_{Me} \rangle_w$ ). Для *ID137943* параметры движения оценивались по траектории, на которой участок в период 10 июля – 25 сентября 2016 г. с большими (сбойными) отклонениями заменен на линейно интерполированный. На этом участке траектории, показанном на графике более темным цветом, ледник, вероятно, огибал скальные образования, которые экранировали приемник *GPS* радиомаяка, что приводило к существенно большей неопределенности в оценивании координат.

По данным радиомаяка *ID137942*, аномально высокая скорость движения наблюдалась 16–23 октября 2016 г. Смещение ледника на 54,4 м за эту неделю (рис. 3) объясняется, по всей видимости, его движением по наклонному участку подстилающей поверхности. В дальнейшем характеристики траектории ледника были подобны наблюдавшимся ранее, а данные, полученные 23 октября 2016 г., в приводимых ниже результатах не учитывались.

Полученные с помощью радиомаяков представительные ряды траекторных измерений продолжительностью более двух лет позволяют оценить межсезонную изменчивость параметров движения ледников. Здесь, наряду с ожидаемыми максимумами скоростей в июле и августе, наблюдались также максимумы в осенне-зимний период. Так, локальные максимумы среднесуточной скорости по данным радиомаяка *ID137943* были зафиксированы в октябре 2016 г. (35 см/сут) и январе 2017 г. (32 см/сут), по данным радиомаяка *ID137953* – в январе 2017 г. (69 см/сут).



**Рис. 3.** Траектории ледников (слева); временные ряды ежемесячных расстояний  $S_m$  и скорости движения  $V_w$  (справа), рассчитанные по еженедельным среднесуточным координатам радиомаяков ID137942, ID137943, ID137953

**Fig. 3.** Trajectories of glaciers (on the left); time series of  $S_m$  monthly distances and  $V_w$  velocity (on the right) calculated by weekly daily average coordinates of ID137942, ID137943 and ID137953 satellite tracker

Наиболее интенсивным за все время наблюдений оказалось движение ледника, восстановленное по данным радиомаяка *ID137953*. За 756 сут ледник сместился на 412 м при длине траектории 432 м. Наибольшее смещение было зафиксировано 19–26 июня 2016 г. и составило 9 м (~130 см/сут); наименьшее – 5–12 июня 2016 г. и составило 1,2 м (~17 см/сут).

В передаваемой радиомаяками информации кроме данных о местоположении содержатся также результаты измерений температуры льда. Измерения с погрешностью не более 0,1 °С выполняются каждое воскресенье в 18 ч 00 мин. Из сопоставления временных рядов температур и скоростей движения ледников можно сделать вывод, что сезонный ход температуры значительно в большей степени связан с флуктуациями скорости, чем с ее средними оценками.

**Заключение.** В 2015–2017 гг. на архипелагах Арктической зоны Российской Федерации были опробованы радиомаяки *iceST/40-Glacier*, разработанные в Морском гидрофизическом институте РАН и предназначенные для наблюдений ледниковых образований. Аппаратно-программные решения, реализованные в радиомаяках, были направлены на создание относительно недорогого средства широкого применения, обеспечивающего высокую достоверность измерений координат, оперативность доставки данных пользователям, долговременную автономность, устойчивость к воздействию влияющих факторов, характерных для полярных регионов, простоту технологии развертывания. Результаты натурного эксперимента не только подтвердили, но и во многом превзошли ожидаемые характеристики: время автономной работы 4 из 12 радиомаяков превысило 2 года; данные мониторинга были переданы пользователям по каналам спутниковой системы *Argos-2* практически в полном объеме; погрешность определения местоположения в 93% отсчетов не превысила 1 м.

В ходе эксперимента, первоначальная цель которого состояла в проверке работоспособности радиомаяков, были получены уникальные по продолжительности временные ряды измерений, позволяющие статистически значимо оценить характеристики движения ледников в широком диапазоне пространственно-временных масштабов.

Результаты приведенного анализа свидетельствуют о создании эффективного автономного средства наблюдений покровных ледников, которое может рассматриваться как элемент надежной и экономной системы долговременного оперативного мониторинга ледовой обстановки в Арктике. Такая система позволит повысить безопасность судоходства и функционирующих на арктическом шельфе нефтедобывающих платформ, обеспечить валидацию данных, получаемых дистанционными методами.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0011 «Исследования закономерностей изменений состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий» (шифр «Оперативная океанография») при финансовой поддержке ПАО «НК «Роснефть».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акимов В. А., Козлов К. А., Косоруков О. А.* Современные проблемы Арктической зоны Российской Федерации. М. : ВНИИ ГОЧС, 2014. 308 с.
2. *Говорушко С. М.* Ледники и их значение для человеческой деятельности // Вестник ДВО РАН. 2006. № 6. С. 60–70.
3. Glacier Remote Sensing Using Sentinel-2. Part II: Mapping Glacier Extents and Surface Facies, and Comparison to Landsat-8 / F. Paul [et al.] // Remote Sens. 2016. Vol. 8, iss. 7. P. 575. doi:10.3390/rs8070575
4. *Pope A., Rees W. G.* Impact of spatial, spectral, and radiometric properties of multispectral imagers on glacier surface classification // Remote Sens. Environ. 2014. Vol. 141. P. 1–13.
5. Современные изменения ледников горных районов России / В. М. Котляков [и др.] М. : Тов-во научных изданий КМК, 2015. 287 с.
6. *Bolch T.* Assessment of cryospheric variations in different climatic regimes and their impacts using geomatics. Technische Universität Dresden : Habilitation, 2011. 268 p. URL: [https://www.researchgate.net/publication/272793711\\_Assessment\\_of\\_cryospheric\\_variations\\_in\\_different\\_climatic\\_regimes\\_and\\_their\\_impacts\\_using\\_geomatics](https://www.researchgate.net/publication/272793711_Assessment_of_cryospheric_variations_in_different_climatic_regimes_and_their_impacts_using_geomatics) (дата обращения: 20.09.2017).
7. *Карелин А. В., Наговицына Н. В.* Базовые элементы и метрологические аспекты валидационных работ // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 5 (78). С. 101–107.
8. Информационное обеспечение исследования Арктического региона с использованием гидрометеорологической космической системы «Арктика-М» / А. А. Асташкин [и др.] // Там же. 2015. № 6. С. 11–19.
9. URL: [https://www.latitude.aq/publications/pdf/low\\_cost\\_gps\\_system\\_2001.pdf](https://www.latitude.aq/publications/pdf/low_cost_gps_system_2001.pdf) (дата обращения: 20.09.2017).
10. Stand-alone single-frequency GPS ice velocity observations on Nordenskiöldbreen, Svalbard / M.A.G. den Ouden [et al.] // The Cryosph. 2010. Vol. 4. P. 593–604. doi:10.5194/tc-4-593-2010
11. URL: <http://marlin-yug.com/ru/home> (дата обращения: 20.09.2017).
12. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М. : Планета, 2012. С. 360–399.
13. URL: <http://www.argos-system.org> (дата обращения: 20.09.2017).
14. URL: <http://www.leb.esalq.usp.br/disciplinas/Molin/leb447/Arquivos/GNSS/ArtigoAcuraciaGPSsemAutor.pdf> (дата обращения: 20.09.2017).
15. *Zandbergen P. A.* Positional Accuracy of Spatial Data: Non-Normal Distributions and a Critique of the National Standard for Spatial Data Accuracy // Trans. GIS. 2008. Vol. 12, iss. 1. P. 103–130. doi:10.1111/j.1467-9671.2008.01088.x

*Об авторах:*

**Мотыжев Сергей Владимирович**, руководитель научного направления по приборостроению, старший научный сотрудник, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор технических наук, **ORCID: 0000-0002-8438-2602**, [motyzhev@marlin-yug.com](mailto:motyzhev@marlin-yug.com)

**Толстошеев Алексей Петрович**, старший научный сотрудник, отдел инновационных технологий, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID: 0000-0002-0771-0879**, [tolstosheev@marlin-yug.com](mailto:tolstosheev@marlin-yug.com)

**Лунев Евгений Геннадьевич**, научный сотрудник, отдела инновационных технологий, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID: 0000-0002-7138-3024**, [lunev@marlin-yug.com](mailto:lunev@marlin-yug.com)

**Сальман Александр Леонидович**, генеральный директор ООО «ЭС-ПАС» (125171, Россия, г. Москва, Ленинградское шоссе, д. 15, кв. 73), [a.salman@es-pas.com](mailto:a.salman@es-pas.com)