

Перспективный полигон калибровки альтиметрических измерений российской космической геодезической системы

С. А. Лебедев^{1,2,3}, И. В. Гусев^{1,4}

¹ *Геофизический центр РАН, Москва, 119296, Россия
E-mails: lebedev@wdcb.ru, giv-wr@yandex.ru*

² *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
Москва, Зеленоград, 124498, Россия*

³ *Майкопский государственный технологический университет
Майкоп, 385000, Россия*

⁴ *АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»
Московская обл., Королёв, 141070, Россия*

В статье рассматриваются вопросы создания стационарного полигона калибровки альтиметрических измерений российской космической геодезической системы «ГЕО-ИК-2». Исходя из параметров орбиты спутников предлагается несколько наиболее перспективных месторасположений стационарного полигона берегового базирования (побережье Чёрного и Каспийского морей) и морского базирования (акватории Каспийского и Балтийского морей). Подробно анализируются преимущества и недостатки каждого потенциального полигона с учётом современных вертикальных движений земной коры, наличия вблизи полигона базовых станций глобальных навигационных спутниковых систем и логистической доступности. На основании международного опыта обосновывается состав измерительной аппаратуры полигона. В качестве необходимого информационного обеспечения аргументируется привлечение результатов расчёта оперативных региональных моделей атмосферы, термодинамики морской акватории, приливов (для приливных морей) и ветрового волнения, а также данных дистанционного зондирования, полученных с борта других космических аппаратов. В статье приведена принципиальная схема методики калибровки данных альтиметрических измерений российских геодезических спутников серии «ГЕО-ИК-2» на стационарном полигоне. Наиболее перспективным полигоном калибровки оказывается участок побережья Чёрного моря в районе м. Железный Рог, рядом с которым для повышения точности рекомендуется установить транспондер.

Ключевые слова: спутниковая альтиметрия, полигон калибровки, космическая геодезическая система

Одобрена к печати: 31.03.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-67-80

Введение

Метод спутниковой альтиметрии, на протяжении более трёх десятилетий применяемый для изучения внешнего гравитационного поля Земли (ГПЗ) и решения ряда океанографических задач, и сегодня не теряет своей актуальности. Это подтверждается действующей группировкой космических аппаратов (КА), проводящих альтиметрические измерения, пополняемой за счёт запусков российских и зарубежных спутников. Так, 4 июня 2016 г. на орбиту был выведен отечественный геодезический спутник «ГЕО-ИК-2» № 12Л (порядковый номер «Космос-2517») (Запуск..., 2016), а 30 августа 2019 г. состоялся запуск второго КА «ГЕО-ИК-2» № 13Л («Космос-2540») (Запущенный..., 2019). Оба аппарата проводят альтиметрические измерения для определения детальных характеристик ГПЗ в Мировом океане и составляют орбитальную группировку российской космической геодезической системы (КГС) «ГЕО-ИК-2». Они функционируют на околокруговой солнечно-синхронной орбите высотой около 954 км и наклоном 99,28°, а их срок активного существования составляет 5 лет (Космический..., 2021).

Основной целевой прибор КА «ГЕО-ИК-2» — спутниковый высокоточный радиовысотомер, предназначенный для прецизионного измерения расстояния от КА до поверхности Мирового океана. На КА серии «ГЕО-ИК-2» установлен двухчастотный высотомер (альтиметр) «Садко-3», произведённый европейской компанией Thales Alenia Space по заказу АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» (Высотомер..., 2012). Этот прибор стал аналогом альтиметров серии Poseidon, установленных ранее на зарубежных спутниках TOPEX/Poseidon (Topography Experiment/Poseidon) и Jason-1/2/3. Для высокоточного определения орбиты КА «ГЕО-ИК-2» оборудованы аппаратурой спутниковой навигации (АСН) и панелью лазерных уголкового отражателей. Существенный недостаток заключается в отсутствии микроволнового радиометра на борту, измерения которого используются для компенсации тропосферной задержки.

Аналогичными действующими зарубежными проектами выступают КА Jason-3, запущенный 17 января 2017 г. (<https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/j/Jason-3>), КА Sentinel-3A — 16 января 2016 г., и Sentinel-3B — 25 апреля 2018 г. (<https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-eo-missions/sentinel-3>), КА HY-2B (Haiyang-2B) — 24 октября 2018 г. (China..., 2018) и др.

В свою очередь, обработка данных спутниковой альтиметрии оказывается сложной научно-технической задачей и состоит не только из обработки бортовых измерений альтиметра, микроволнового радиометра и АСН, но и требует комплексного использования результатов моделирования состояния атмосферы, ионосферы и Мирового океана для расчёта соответствующих поправок в измерения.

По результатам обработки данных спутниковой альтиметрии удаётся определить высоту морской поверхности (ВМП) относительно отсчётного эллипсоида на субмиллиметровом уровне точности. Повышение точности определения ВМП чрезвычайно важно для решения геодезической задачи — определения детальных характеристик ГПЗ в Мировом океане.

Подтверждение такого уровня точности невозможно без проведения регулярных калибровок альтиметрических измерений ВМП, для чего создаются специализированные полигоны калибровки. Зарубежный опыт показывает, что методика калибровки данных спутниковой альтиметрии в настоящий момент представляет собой сложный технологический процесс, в котором используется широкий спектр измерительной аппаратуры (Лебедев, Гусев, 2021). Потребность в создании отечественного стационарного полигона калибровки обусловлена эксплуатацией российской космической геодезической системы «ГЕО-ИК-2» и проектированием перспективной КГС «ГЕО-ИК-3» (Тестоедов, 2016). В статье представлены предложения по созданию и оснащению перспективного полигона калибровки альтиметрических измерений ВМП.

Место расположения

Сложность выбора места расположения стационарного полигона для калибровки альтиметрических измерений связана с тем, что они выполняются только вдоль треков. Размер пятна засветки составляет несколько километров, поэтому береговой полигон должен располагаться в районе точки пересечения какого-либо трека с береговой линией. Оптимально, чтобы вблизи находилась точка пересечения восходящих и нисходящих треков на расстоянии не более 20–30 км от береговой линии. Для морского полигона, расположенного на платформе, оптимальное место установки измерительной аппаратуры — на треке или в точке пересечения треков.

Место расположения полигона требует хорошей транспортной доступности, развитых геодезической и метеорологической сетей, стабильного энергетического обеспечения, надёжных высокоскоростных каналов связи. Оптимально, чтобы полигон располагался вдали от крупных морских портов и оживлённых транспортных путей. Для постоянного использования полигона необходимо, чтобы он находился в акватории, где не наблюдается сезонный ледовый покров. При выборе местоположения полигона на акватории одного из внутренних

морей России необходимо учитывать изрезанность береговой линии и высоты приливов, а также наличие сейшевых колебаний и сгонно-нагонных явлений. Площадь водной акватории стационарного полигона должна составлять порядка 30×30 км.

Стационарный полигон берегового базирования

Оптимальный выбор места расположения стационарного наземного полигона на территории России — черноморское побережье Краснодарского края или дагестанское побережье Каспийского моря.

На черноморском побережье наиболее перспективными для создания стационарного полигона оказываются район м. Железный Рог (п-ов Тамань) и участок побережья вблизи с. Шепси (Туапсинский р-н Краснодарского края). Вблизи этих пунктов расположены точки пересечения треков с береговой линией, а южнее на расстоянии около 10–15 км — точки пересечения восходящих и нисходящих треков спутников «ГЕО-ИК-2» (рис. 1).

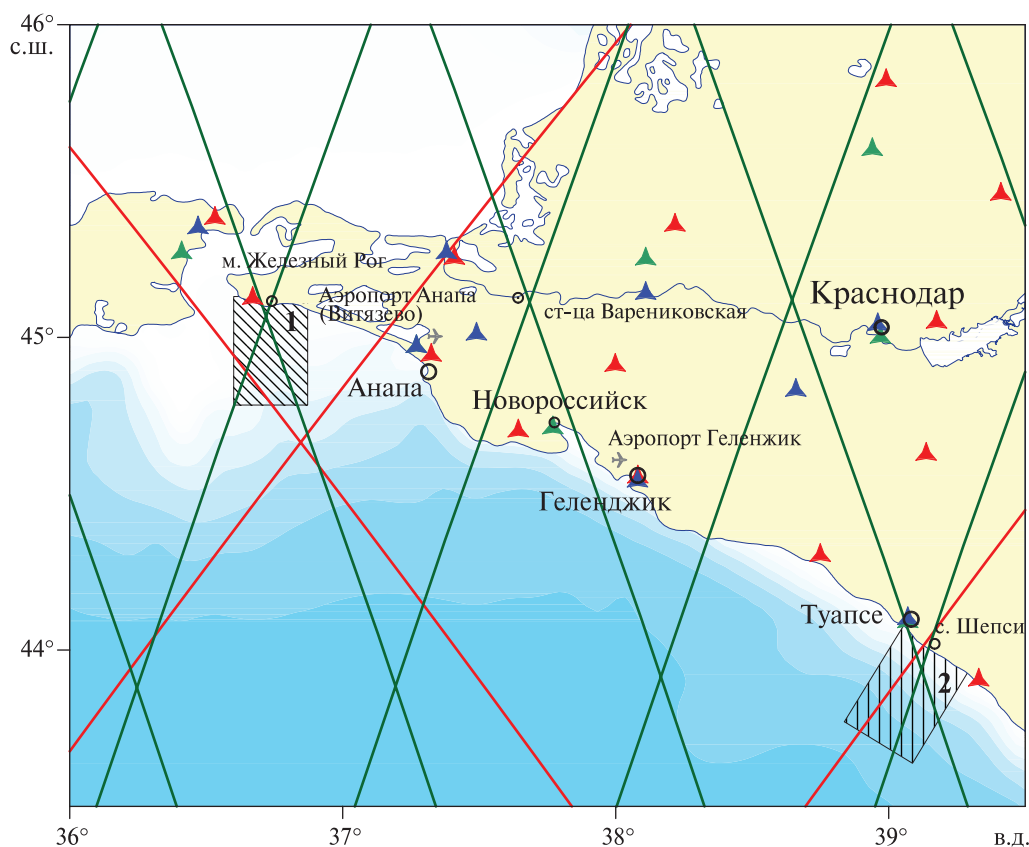


Рис. 1. Места расположения перспективных полигонов калибровки на черноморском побережье Краснодарского края: 1 — район м. Железный Рог; 2 — район с. Шепси. Сплошной зелёной линией показаны треки изомаршрутной программы спутника «ГЕО-ИК-2», красной — TOPEX/Poseidon и Jason-1/2/3. Символом «▲» показано положение базовых станций ГНСС: синий цвет — сети PrinNet (9 станций), красный — сети EFT-CORS (14 станций), зелёный — сети SmartNet Russia (7 станций)

С точки зрения логистики предпочтительным становится первый вариант, так как недалеко находится аэропорт Анапа (Витязево). Береговая линия м. Железный Рог — неактивная курортная зона (у юго-западного берега расположен небольшой пляж) по сравнению с Туапсинским р-ном черноморского побережья Краснодарского края. Акватория моря вблизи мыса не является также активной судоходной зоной. Якорная стоянка судов порта Тамань и Керченского моста расположена западнее.

Этот район находится в зоне покрытия базовых станций ГНСС (глобальные навигационные спутниковые системы) нескольких сетей: двух станций сети PrinNet (Керчь и Витязево), рядом с каждой расположены станции сети SmartNet Russia, а также двух станций федеральной сети EFT-CORS (Керчь и Тамань), последняя находится в непосредственной близости от м. Железный Рог.

Район м. Железный Рог расположен на участке Керченско-Таманского периклинального прогиба в Керченско-Таманской зоне сейсмической активности. По данным повторного прецизионного нивелирования, скорость современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК) в этом районе изменяется от $-0,43 \pm 0,19$ до $-0,2 \pm 0,11$ мм/год (Мешеряков и др., 1971; Национальный..., 2007; Победоносцев, 1982). По последним данным спутникового геодинимического пункта Тамань наблюдательной сети АО «Южморгеология», скорость СВДЗК в Международной земной системе отсчёта ITRF2008 (*англ.* International Terrestrial Reference System) в этом районе с 2013 по 2015 г. составила $+12,11 \pm 0,6$ мм/год (Бабешко и др., 2016), с января 2012 г. по апрель 2018 г. — $+9,9 \pm 0,08$ мм/год (Глазырин, Шестопапов, 2018). Такие разбросы в направлении и величине скорости СВДЗК потребуют тщательной привязки всей измерительной аппаратуры к системе ITRF и проведения постоянного мониторинга СВДЗК в случае выбора района м. Железный Рог в качестве стационарного полигона.

Около ст-цы Варениковская находится точка пересечения восходящих и нисходящих треков (см. *рис. 1*), где оптимально расположить транспондер, представляющий собой радиоприёмопередающее устройство, посылающее сигнал в ответ на принятый сигнал альтиметра. Это повысит эффективность калибровки данных альтиметрических измерений.

Участок побережья вблизи с. Шепси на черноморском побережье Краснодарского края — это активная рекреационная зона. Он находится в зоне покрытия базовых станций ГНСС нескольких сетей: станции Туапсе сетей PrinNet и SmartNet Russia, а также двух станций федеральной сети EFT-CORS (Туапсе и Лазаревское), последняя находится в непосредственной близости от с. Шепси.

Район побережья вблизи с. Шепси расположен на участке Новороссийско-Лазаревской покровно-складчатой зоны Северо-Западного Кавказа в Туапсинско-Сочинской зоне сейсмической активности. По данным повторного высокоточного нивелирования, скорость СВДЗК в этом районе изменяется от $-0,71 \pm 0,14$ до $+0,2 \pm 0,13$ мм/год (Мешеряков и др., 1971; Национальный..., 2007; Победоносцев, 1982). В районе отсутствует пункт спутниковой геодинимической наблюдательной сети. Учитывая разброс в скоростях СВДЗК, создание такого пункта необходимо для тщательной привязки всей измерительной аппаратуры к Международной земной системе отсчёта и проведения постоянного мониторинга СВДЗК в случае выбора района побережья вблизи с. Шепси в качестве стационарного полигона.

На побережье Каспийского моря удобным местоположением стационарного полигона оказалось устье р. Уллучай, расположенное недалеко от с. Сегелер (Дербентский р-н Дагестана) (*рис. 2*, см. с. 71). Северо-восточнее него на расстоянии около 10 и 40 км соответственно расположена точка пересечения восходящих и нисходящих треков спутника «ГЕО-ИК-2». Выбор местоположения этого вероятного стационарного полигона калибровки обусловлен отсутствием в данном районе ледового покрова даже в суровые зимы.

Участок побережья вблизи устья р. Уллучай находится в зоне покрытия базовых станций ГНСС нескольких сетей: двух станций федеральной сети EFT-CORS (Избербаш и Дербент) и одной станции сети SmartNet Russia (Дербент).

Дагестанское побережье Каспийского моря между Махачкалой и Дербентом располагается на границе Терско-Каспийского краевого прогиба и складчатой системы Большого Кавказа. СВДЗК в этой зоне не имеют устойчивого однонаправленного характера.

По данным повторного нивелирования 1971 г., западное побережье Каспийского моря от Махачкалы до Дербента поднимается со скоростью 6–9 мм/год (Касьянова, 2001; Мешеряков и др., 1971). Повторное нивелирование, проводимое в 1986 г., показало снижение скоростей СВДЗК до +2 мм/год (Кузнецов и др., 1997). С другой стороны, по данным работы (Глумов и др., 2004), этот участок побережья Каспийского моря опускается со скоростью –2 мм/год. Такая инверсия СВДЗК требует регулярного мониторинга геодинимических

движений в регионе на сети специализированных станций. В настоящее время на территории Дагестана действуют 16 станций геодинамического мониторинга с ГНСС-реперами, измерения на которых ведутся периодически (несколько раз в течение года) (Булаева и др., 2008а, б). Четыре из них: Махачкала, Манас (вблизи Каспийска), Первомайск (вблизи Избербаша) и Рукель (вблизи Дербента) — находятся на побережье Каспийского моря или рядом с ним. Район предполагаемого расположения калибровочного полигона вблизи с. Сегелер находится между двумя последними станциями.

Плохая транспортная доступность и логистика делают полигон вблизи устья р. Уллучай малопригодным.

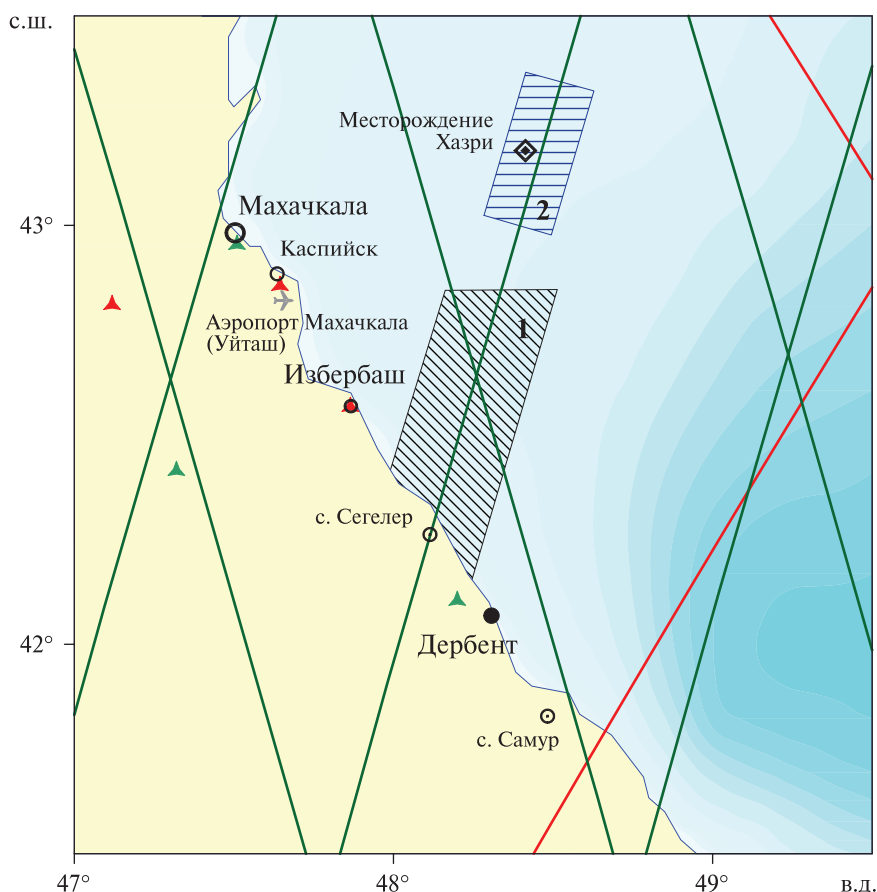


Рис. 2. Места расположения перспективных полигонов калибровки на дагестанском побережье Каспийского моря: 1 — район с. Сегелер, 2 — район структуры Хазри. Сплошной зелёной линией показаны треки изомаршрутной программы спутника «ГЕО-ИК-2», красной — TOPEX/Poseidon и Jason-1/2/3. Символом «▲» показано положение базовых станций ГНСС: красный цвет — сети EFT-CORS (3 станции), зелёный — сети SmartNet Russia (3 станции). Символом «◆» показано положение нефтедобывающих платформ

Стационарный полигон морского базирования

Выбор стационарного морского полигона осложнён тем фактом, что добыча нефти или газа на шельфе внутренних морей России началась только с 1987 г., когда наладилась добыча нефти на месторождении Приразломном, расположенном на шельфе Печорского моря в 60 км от берега (пос. Варандей).

В 2010 г. было введено в эксплуатацию нефтегазоконденсатное месторождение им. Ю. Корчагина, расположенное в северной части акватории Каспийского моря в 180 км от Астрахани и 240 км от Махачкалы. В 2013 г. в северной части акватории Каспийского моря было введено в эксплуатацию нефтегазоконденсатное месторождение им. В. Филановского,

расположенное в 190 км от Астрахани. Все действующие нефтедобывающие платформы находятся в зоне возникновения сезонного ледового покрова (Думанская, 2014), поэтому для создания стационарного полигона калибровки не подходят.

В перспективе в начале эксплуатации структуры Хазри (см. рис. 2) Центрально-Каспийского участка, расположенного в средней части акватории Каспийского моря в 150 км от Махачкалы, возможно использование нефтедобывающей платформы в качестве стационарного морского полигона калибровки.

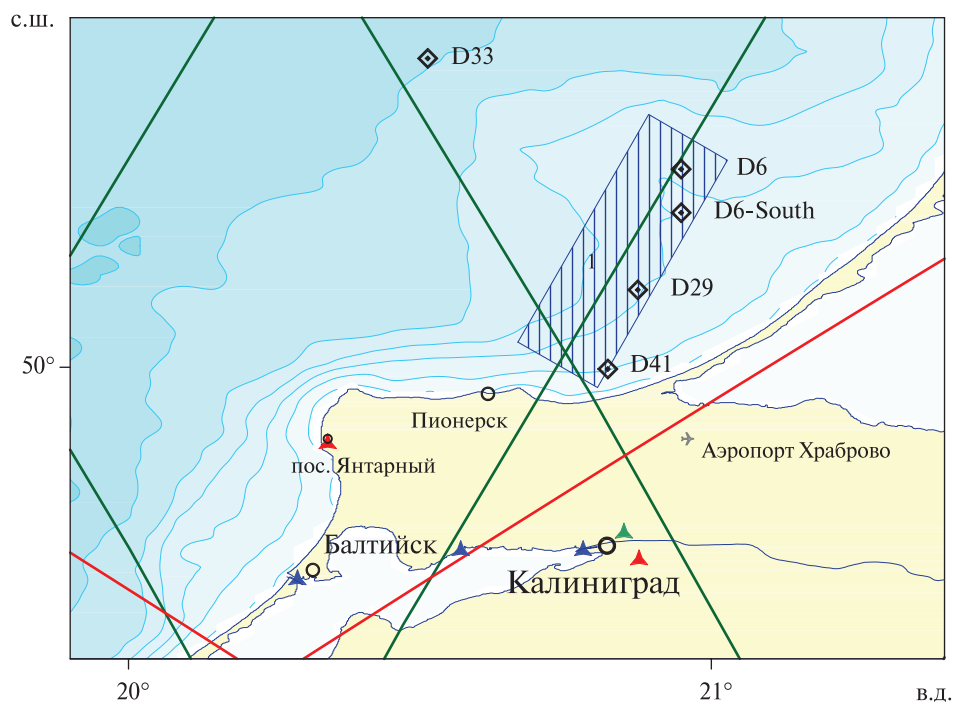


Рис. 3. Местоположение перспективного полигона калибровки на акватории Балтийского моря (1) на нефтедобывающей платформе D6 месторождения Кравцовское. Сплошной зелёной линией показаны треки изомаршрутной программы спутника «ГЕО-ИК-2», красной — TOPEX/Poseidon и Jason-1/2/3. Символом «▲» показано положение базовых станций ГНСС: синий цвет — сети PrinNet (три станции), красный — сети EFT-CORS (2 станции), зелёный — сети SmartNet Russia (1 станция). Символом «◆» показано положение нефтедобывающих платформ

Наиболее перспективным в качестве морского полигона калибровки выступает нефтедобывающая платформа D6 месторождения Кравцовское, расположенного в пределах Куршского участка российского шельфа Балтийского моря в 22,5 км от побережья Калининградской обл., где в 2004 г. началась промышленная добыча нефти (рис. 3). Кравцовская структура находится в пределах Куршского тектонического блока, приуроченного к экваториальной части Балтийской синеклизы. Расположение нефтедобывающей платформы вблизи трека спутника «ГЕО-ИК-2» позволяет создать на её базе современный морской полигон. Ввод в эксплуатацию месторождения D33 в 2023 г. также позволит расширить возможности данного полигона. Южнее платформы D6 располагается точка пересечения восходящего и нисходящего треков спутника «ГЕО-ИК-2», что тоже увеличит потенциал полигона. Из-за ледовых условий Балтийского моря невозможно строительство наземного полигона калибровки (Думанская, 2014). Расположение платформы D6 на значительном удалении от береговой линии и система течений в прилегающей акватории Балтийского моря позволяют рассчитывать на работу морского полигона круглый год.

Таким образом, в настоящее время можно говорить только о создании береговых стационарных полигонов калибровки данных альтиметрических измерений российских геодезических спутников серии «ГЕО-ИК-2».

Следует также рассмотреть возможность создания временных полигонов, которые будут работать не круглогодично, а только в летний период, например на крупных озёрах (Ладожское, Онежское, Ханка и др.) или водохранилищах (Рыбинское и др.). Одним из возможных мест расположения может стать Финский залив Балтийского моря благодаря развитой инфраструктуре.

Состав измерительной аппаратуры

Состав измерительной аппаратуры в первую очередь определяется перечнем океанографических, метеорологических и геодезических параметров, измерения которых необходимо проводить на полигоне, а также задач, для которых они предназначены (табл. 1).

Таблица 1. Перечень океанографических и метеорологических параметров для оптимального функционирования полигона калибровки спутниковых альтиметрических измерений

Параметр	Задача
Уровень моря	Калибровка данных альтиметрических измерений
Атмосферное давление	Расчёт «сухой» тропосферной поправки
Вертикальные профили температуры и влажности воздуха	Расчёт интегрального содержания водяного пара в атмосфере для расчёта поправки на влажность
Скорость приводного ветра	Расчёт поправки на состояние подстилающей поверхности
Высота волнения	
Точные координаты всей измерительной техники	Расчёт расстояний и высот измерительной аппаратуры
Вертикальные скорости движения земной коры	Повышение точности инструментальных измерений уровня моря

Таким образом, минимальный состав измерительной аппаратуры на стационарном береговом полигоне должен включать:

- уровенные посты (желательно автоматические) различных типов;
- мареографы различного типа, расположенные вблизи уровенных постов, на заякоренных буйках или на дне вблизи трека или точки пересечения треков;
- заякоренные буи с ГНСС-приёмником;
- буксируемые вдоль треков буи с ГНСС-приёмником;
- автоматические метеостанции, расположенные вблизи уровенных постов, на заякоренных буйках и транспортных средствах, осуществляющих буксировку буйков с ГНСС-приёмником;
- наземные микроволновые радиометры (вблизи уровенных постов);
- измерители волнения (закреплённые на заякоренном буйке; придонные акустические измерители волнения; измерители параметров волнения дистанционного типа, расположенные на возвышенности; дрейфующие буи измерители волнения и др.);
- измерители профиля температуры и солёности (CTD-зонд (*англ.* Conductivity, Temperature and Depth)) (закреплённые на заякоренном буйке);
- стационарные ГНСС-станции для привязки всех приборов, измеряющих уровень моря и расположенных вблизи основного уровенного поста.

Кроме всего вышеперечисленного, следует отметить, что для калибровки орбит спутников, определяемых из обработки наблюдений ГНСС, необходимы прецизионные лазерные измерения дальности до КА, что требует установки на полигоне квантово-оптической станции спутниковой лазерной дальнометрии.

Обеспечение полигона результатами модельных расчётов

Для оптимального проведения верификации данных альтиметрических измерений на полигоне необходимо функционирование трёх моделей в оперативном режиме на всё время работы полигона (т. е. всё время работы спутника с альтиметром на борту).

В первую очередь это *региональная модель атмосферы* (например, модель WRF (Weather Research and Forecasting) (Skamarock et al., 2005) или COSMO (COntortium for Small-scale atmospheric MOdeling) (Вильфанд и др., 2010)).

Использование региональных моделей атмосферы связано с тем, что для расчёта «сухой» поправки, необходимой для обработки данных альтиметрических измерений, требуется информация об атмосферном давлении на уровне моря. Данные измерений на метеостанции могут существенно отличаться от данных об атмосферном давлении на открытой акватории моря. С учётом того, что треки спутника (наземный след) могут смещаться в пределах 1 км, данных измерений будет не хватать, и они обязательно внесут ошибку в обработку измерений альтиметра, а соответственно, и его калибровку.

С другой стороны, данные региональных моделей атмосферы (интегральное содержание водяного пара, профили температуры и влажности воздуха) в совокупности с измерениями этих параметров на полигоне позволят создать новые или провести верификацию уже разработанных алгоритмов расчёта поправки на влажность, необходимой для обработки данных альтиметрических измерений. С учётом факта, что на борту спутников серии «ГЕО-ИК-2» отсутствует микроволновый радиометр, данная поправка может быть учтена только по результатам модельных расчётов.

Данные расчётов по региональной модели атмосферы — это исходные данные для региональных моделей термогидродинамики и волнения морской акватории, где расположен полигон.

Региональная модель термогидродинамики при соблюдении отдельных требований позволяет рассчитать стерический уровень моря, необходимый для верификации данных альтиметрических измерений. Она должна усваивать данные о температуре поверхности моря, стоке рек и т. д. и иметь максимальное пространственное разрешение и максимальное разрешение вблизи береговой линии. Расчёт термогидродинамических параметров состояния водной среды в районе полигона может производиться на вложенной сетке региональной модели всего моря. Максимальное разрешение береговой линии может достигаться использованием треугольной расчётной сетки или смещением полюсов.

Региональная модель приливов необходима для калибровки данных альтиметра в случае, когда калибровочный полигон расположен в приливном море.

Региональная модель волнения необходима для сравнения поправки на состояние подстилающей поверхности, рассчитываемой по данным о скорости приводного ветра и высоте волн, которые могут быть измерены на полигоне. С учётом того, что скорость приводного ветра рассчитывается по данным о коэффициенте обратного рассеяния, полученного после обработки данных альтиметрических измерений процедурой ретрекинга, необходима верификация или разработка новых алгоритмов расчёта скорости ветра. По этой причине наличие измерений данного параметра и результатов расчёта по модели есть необходимая часть работы полигона.

Обеспечение полигона данными дистанционного зондирования

Для верификации уже существующих и разработки новых алгоритмов расчёта скорости приводного ветра, поправки на влажность и поправки на состояние подстилающей поверхности кроме измерений и результатов модельных расчётов необходимы данные других датчиков дистанционного зондирования (ДЗЗ) (табл. 2).

Таблица 2. Перечень данных ДЗЗ, необходимых для обеспечения работы полигона калибровки

Параметр	Датчики ДЗЗ, базирующиеся на борту разных КА	Задача
Интегральное содержание водяного пара	СВЧ-радиометр	Расчёт поправки на влажность для обработки данных спутниковой альтиметрии. Верификация алгоритмов расчёта и разработка новых алгоритмов
Скорость приводного ветра	Скаттерометр РСА (радар с синтезированной апертурой)	Расчёт поправки на состояние подстилающей поверхности для обработки данных спутниковой альтиметрии. Верификация алгоритмов расчёта и разработка новых алгоритмов
Высота волн		
Температура поверхности моря	ИК-радиометр	Усвоение данных в региональной модели термогидродинамики моря
	СВЧ-радиометр	

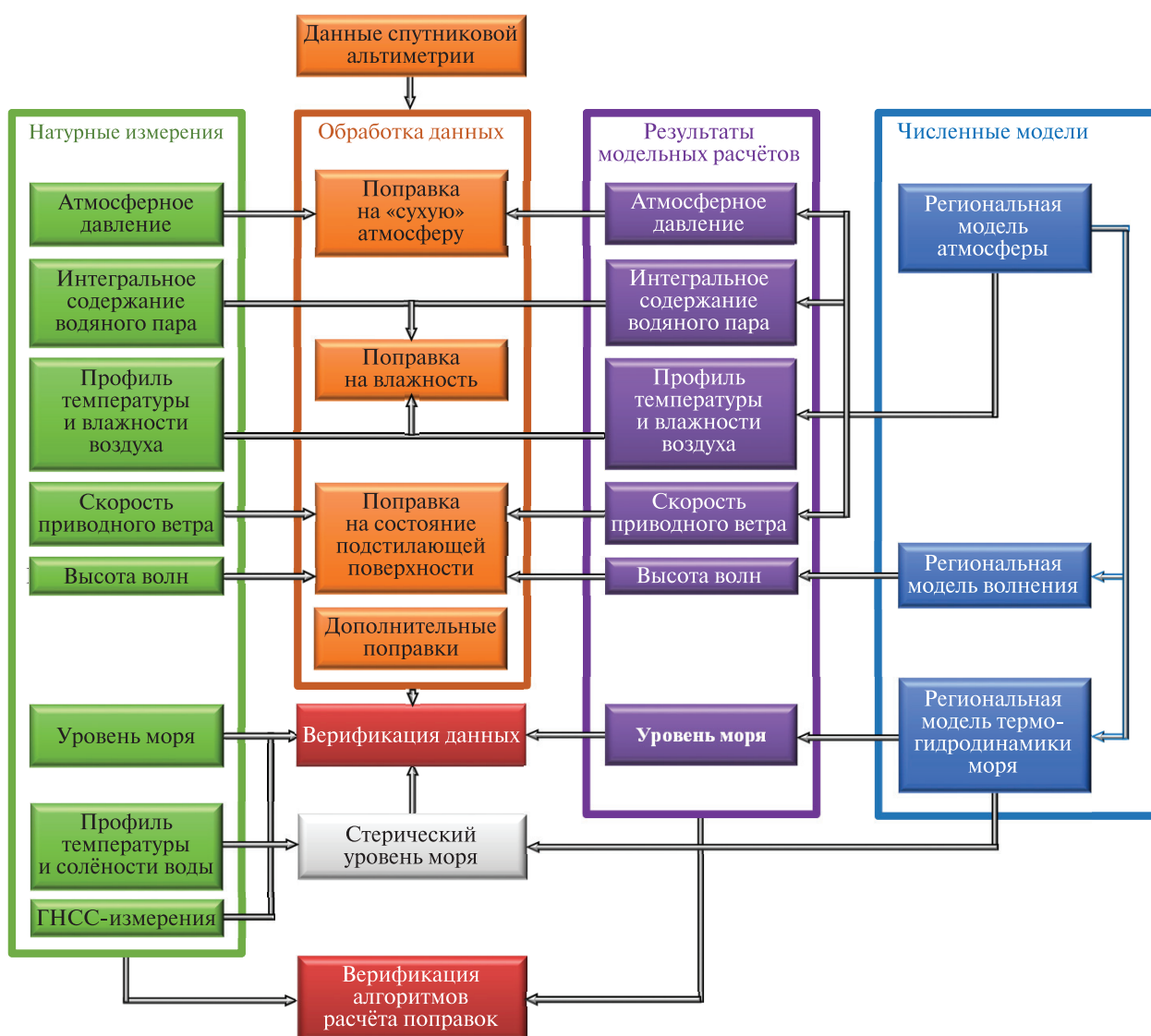


Рис. 4. Принципиальная схема методики калибровки данных альтиметрических измерений

Необходимость специализированного центра хранения данных ДЗЗ непосредственно на полигоне калибровки отсутствует. Они могут накапливаться и храниться в центрах хранения и обработки данных дистанционного зондирования Земли. Пример таких центров —

Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») (Лупян и др., 2015), система See the Sea, созданная также в ИКИ РАН (Лупян и др., 2012), в Научно-исследовательском центре космической гидрометеорологии «Планета» (НИЦ «Планета»), на Геопортале спутникового радиотепловидения «ИКАР», созданного во Фрязинском филиале Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН (ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН) (Ермаков, Чернушич, 2017).

Принципиальная схема методики калибровки данных альтиметрических измерений российских геодезических спутников серии «ГЕО-ИК-2» представлена на *рис. 4* (см. с. 75).

Гравиметрическое обеспечение полигона калибровки

Как было показано выше, КГС «ГЕО-ИК-2» предназначена прежде всего для изучения детальных характеристик ГПЗ в Мировом океане, поэтому гравиметрическое обеспечение полигона калибровки имеет первостепенное значение.

Под гравиметрическим обеспечением (полигона калибровки) будем понимать наличие геодезических и гравиметрических информационных ресурсов, а именно параметров ГПЗ (аномалии силы тяжести, высота геоида над эллипсоидом и др.) в точках с известными координатами, необходимых для проведения специальных геодезических работ, в данном случае калибровки спутниковых альтиметрических данных и определения по этим данным детальных характеристик ГПЗ.

Как правило, для гравиметрического обеспечения полигона калибровки используют региональные и глобальные модели ГПЗ, например высокостепенную модель EGM2008, а также выполняют детальную аэрогравиметрическую съёмку над акваторией полигона, в результате которой с борта самолёта гравиметром производят измерения поля силы тяжести.

Как показывает практика, результаты аэрогравиметрической съёмки в значительной мере позволяют уточнить детальные характеристики ГПЗ, что особенно важно для прибрежных районов, где спутниковые альтиметрические измерения могут иметь большие ошибки (Olesen et al., 2003). В статье (Конешов и др., 2016) показано, что величина систематической погрешности современных моделей ГПЗ относительно результатов аэрогравиметрических измерений может составлять до 10 мГал даже для средних широт, что также согласуется с данными, полученными в работе (Olesen et al., 2003).

Заключение

Полигон калибровки в общем случае представляет собой район морской акватории, обеспеченный детальной гравиметрической съёмкой и оборудованный комплексом различных измерительных средств берегового и морского базирования, а также комплексом средств сбора и обработки измерительной информации, необходимой для калибровки, оценки и контроля работы бортового альтиметра, микроволнового радиометра и оценки точности определения орбиты КА.

Полигон калибровки данных спутниковой альтиметрии выступает составной частью космической геодезической системы и предназначен для метрологического обеспечения альтиметрических измерений. Под метрологическим обеспечением следует понимать установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности выполняемых измерений.

Отсутствие полноценного полигона калибровки делает затруднительным подтверждение заданных тактико-технических характеристик КГС «ГЕО-ИК-2», поэтому в статье рассматривается концепция перспективного полигона для калибровки данных российских альтиметрических спутников, входящих в состав отечественной космической геодезической системы второго и третьего поколений.

Особенностью перспективного полигона должна стать система калибровки не только данных альтиметрических измерений (высота поверхности моря, значимая высота волны), но и методов и алгоритмов расчёта поправок, необходимых для обработки данных спутниковой альтиметрии, а также скорости приводного ветра. Для этого кроме инструментальных измерений требуется привлечение результатов модельных расчётов параметров состояния как атмосферы, так и моря. Это позволит учесть межгодовые изменения в расчётах тропосферных поправок («сухой» поправки и поправки на влажность) и повысить востребованность данных отечественных альтиметрических спутников для решения не только задач геодезического обеспечения, но и научных задач, а также развития на этой основе международного сотрудничества.

Литература

1. *Бабешко В. А., Шестопалов В. Л., Юбко В. М., Глазырин Е. А.* Характер движений поверхности земной коры по данным GPS-измерений в районе Азово-Черноморского побережья Российской Федерации // Наука Юга России. 2016. Т. 12. № 4. С. 33–40.
2. *Булаева Н. М., Магомедов Б. И., Халилов А. Г., Магомедмирзоев Н. М., Османов Р. Ш.* (2008а) Мониторинг современных движений земной коры на территории Дагестана // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 330–336.
3. *Булаева Н. М., Романов Н. Т., Халилов А. Г., Магомедов Б. И., Галаганов О. Н., Гусева Т. В.* (2008б) К созданию геодинимического мониторинга современных движений земной коры на территории Дагестана // Изв. Дагестанского гос. педагог. ун-та. Естественные и точные науки. 2008. № 2(3). С. 88–91.
4. *Вильфанд Р. М., Ривин Г. С., Розинкина И. А.* Мезомасштабный краткосрочный прогноз погоды в Гидрометцентре России на примере COSMO-Ru // Метеорология и гидрология. 2010. № 1. С. 5–17.
5. Высотомер «САДКО-3» для геодезического спутника АО «ИСС» // АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». 08.08.2012. URL: <https://www.iss-reshetnev.ru/media/news/news-080812> (дата обращения: 16.02.2021).
6. *Глазырин Е. А., Шестопалов В. Л.* Современные движения поверхности Земли Российского сегмента побережья Черного моря по данным GPS-наблюдений // Система Черного моря / отв. ред. А. П. Лисицын. М.: Науч. мир, 2018. С. 76–84.
7. *Глумов И. Ф., Маловицкий Я. П., Новиков А. А., Сенин Б. В.* Региональная геология и нефтегазоносность Каспийского моря. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. 342 с.
8. *Думанская И. О.* Ледовые условия морей европейской части России. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2014. 605 с.
9. *Ермаков Д. М., Чернушич А. П.* Текущие возможности геопортала спутникового радиотепловидения и некоторые итоги проекта «ИКАР» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 7. С. 321–324. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-321-324.
10. Запуск спутника «ГЕО-ИК-2» // АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». 06.06.2016. URL: <https://www.iss-reshetnev.ru/media/news/news-060616> (дата обращения: 16.02.2021).
11. Запущенный с Плесецка военный спутник выведен на целевую орбиту // ТАСС. 30.08.2019. URL: <https://tass.ru/armiya-i-opk/6826272> (дата обращения 16.02.2021).
12. *Касьянова Н. А.* Влияние современных геодинимических процессов на уровенный режим Каспийского моря // Бюл. Московского о-ва испытателей природы. Отдел геолог. 2001. Т. 76. Вып. 6. С. 3–14.
13. *Конешов В. Н., Соловьев В. Н., Погорелов В. В., Непоклонов В. Б., Афанасьева Л. В., Дробышев М. Н.* Об использовании аэрогравиметрических измерений для оценки региональных погрешностей аномалий силы тяжести, полученных по современным моделям гравитационного поля Земли // Геофизические исследования. 2016. Т. 17. № 3. С. 5–16. DOI: 10.21455/gr2016.3-1.
14. Космический аппарат «ГЕО-ИК-2» // АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». 2021. URL: <https://www.iss-reshetnev.ru/spacecraft/spacecraft-geodesy/geo-ik2> (дата обращения: 16.02.2021).
15. *Кузнецов Ю. Г., Кафтан В. И., Бебутова В. К., Серебрякова Л. И., Верещетина А. В.* Современные вертикальные движения земной поверхности Прикаспийского региона // Геодезия и картография. 1997. № 9. С. 29–34.

16. Лебедев С. А., Гусев И. В. Международный опыт калибровки данных спутниковой альтиметрии на стационарных и временных полигонах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. №2. С. 18–35. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-18-35.
17. Лупян Е. А., Матвеев А. А., Уваров И. А., Бочарова Т. Ю., Лаврова О. Ю., Митягина М. И. Спутниковый сервис See the Sea — инструмент для изучения процессов и явлений на поверхности океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 251–261.
18. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
19. Мещеряков Ю. А., Буланже Ю. Д., Выржиковский Г. Е. Карта современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы. М.: ГУГК СССР, 1971.
20. Национальный атлас России. Т. 2. Природа и экология. М.: ПКО «Картография», 2007. С. 50–51.
21. Победоносцев С. В. Вертикальные движения побережий морей Европейской части СССР // Колебания уровня морей и океанов за 15 000 лет / ред. П. А. Каплин, Р. К. Клиге, А. Л. Чепалыга. М.: Наука, 1982. С. 93–102.
22. Тестоедов Н. А. Информационные спутниковые системы в науке и технике. Научное сообщение на Президиуме РАН // РАН. 21.06.2016. URL: http://www.ras.ru/news/news_release.aspx?ID=a68d60c3-201a-4821-ac0e-88aa2e3d7658 (дата обращения: 16.02.2021).
23. China launches HY-2B marine satellite // China Daily. 25.10.2018. URL: <http://www.chinadaily.com.cn/a/201810/25/WS5bd16363a310eff303284866.html> (accessed 16.02.2021).
24. Olesen A. V., Tziavos I. N., Forsberg R. New Airborne Gravity Data Around Crete: First Results from the CAATER Campaign // Gravity and Geoid 2002: Proc. 3rd Meeting Intern. Gravity and Geoid Commission / ed. I. N. Tziavos. Thessaloniki: Ziti Editions, 2003. P. 40–44.
25. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Barker D. M., Wang W., Powers J. G. A Description of the Advanced Research WRF Version 2 (No. NCAR/TN-468+STR) / University Corporation for Atmospheric Research. Boulder: NCAR, 2005. 100 p. DOI: 10.5065/D6DZ069T.

Prospective calibration site for altimetry measurements of the Russian satellite geodetic system

S. A. Lebedev^{1,2,3}, I. V. Gusev^{1,4}

¹Geophysical Center RAS, Moscow 119296, Russia
E-mails: lebedev@wdcb.ru, giv-wr@yandex.ru

²National Research University “MIET”, Moscow, Zelenograd 124498, Russia

³Maykop State Technological University, Maykop 385000, Russia

⁴Joint Stock Company “Central Research Institute for Machine Building”
Moscow Region, Korolev 141070, Russia

Development of a stationary calibration site for altimetry measurements of the GEO-ИК-2 Russian satellite geodetic system is considered. Based on the orbital parameters of the satellites, several of the most promising locations for a land-based stationary calibration site (the coast of the Black and Caspian Seas) and sea-based (water areas of the Caspian and Baltic Seas) are proposed. The advantages and disadvantages of each potential calibration site are analyzed in detail, taking into account the modern vertical movements of the Earth’s crust, the presence of the base stations of the Global Navigation Satellite System near the calibration site and logistical accessibility. On the basis of international experience, the composition of the measuring equipment of the calibration site is substantiated. As the necessary information support, it is justified to use the results of calculating operational regional models of the atmosphere, sea thermohydrodynamics, tides (for tidal seas) and wind waves, as well as remote sensing data obtained from other spacecrafts. The article presents a schematic diagram of the method for calibrating the altimetry measurement data of the Russian geodetic satellites

of the GEO-ИК-2 series at a stationary test site. The most promising calibration site is the Black Sea coastal area near Cape Zhelezny Rog, next to which, to improve accuracy, it is recommended to install a transponder.

Keywords: satellite altimetry, calibration site, Russian satellite geodetic system

Accepted: 31.03.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-67-80

References

1. Babeshko V. A., Shestopalov V. L., Yubko V. M., Glazyrin E. A., Description of crust movements according to GPS measurements in the Azov-Black Sea coast area of the Russian Federation), *Nauka Yuga Rossii*, 2016, Vol. 12, No. 4, pp. 33–40 (in Russian).
2. Bulaeva N. M., Magomedov B. I., Khalilov A. G., Magomedmirzoev N. M., Osmanov R. Sh. (2008a), Monitoring of the modern Earth's crust movements on the territory of Dagestan, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 5, No. 1, pp. 330–336 (in Russian).
3. Bulaeva N. M., Romanov N. T., Khalilov A. G., Magomedov B. I., Galaganov O. N., Guseva T. V. (2008b), Towards the creation of geodynamic monitoring of the modern earth's crust movements on the territory of Dagestan, *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Yestestvennye i tochnye nauki*, 2008, No. 2(3), pp. 88–91 (in Russian).
4. Vilfand R. M., Rivin G. S., Rozinkina I. A., Mesoscale weather short-range forecasting at the Hydromet-center of Russia, on the example of COSMO-RU, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2010, Vol. 35, No. 1, pp. 1–9, DOI: 10.3103/S1068373910010012.
5. <https://www.iss-reshetnev.ru/media/news/news-080812> (in Russian, accessed 16.02.2021).
6. Glazyrin E. A., Shestopalov V. L., Modern movements of the Earth's surface in the Russian segment of the Black Sea coast according to GPS observations, In: *System of the Black Sea*, A. P. Lisitsyn (ed.), Moscow: Nauchnyi mir, 2018, pp. 76–83 (in Russian).
7. Glumov I. F., Malovitskiy Ya. P., Novikov A. A., Senin B. V., *Regional'naya geologiya i neftegazonosnost' Kaspiyskogo morya* (Regional Geology and Oil and Gas Content of Caspian Sea), Moscow: OOO "Nedra-Biznestsentr", 2004, 342 p. (in Russian).
8. Dumanskaya I. O., *Ice conditions of the European part of Russia seas*, Moscow, Obninsk: IG-SOTSIN, 2014, 605 p. (in Russian).
9. Ermakov D. M., Chernushich A. P., Current capabilities of the geoportal of satellite radiothermvision and some results of the ICAR project, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 7, pp. 321–324 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-321-324.
10. <https://www.iss-reshetnev.ru/media/news/news-060616> (in Russian, accessed 16.02.2021).
11. <https://tass.ru/armiya-i-opk/6826272> (in Russian, accessed 16.02.2021).
12. Kasyanova N. A., Influence of modern geodynamic processes on the Caspian Sea level regime, *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody. Otdel geologicheskii*, 2001, Vol. 76, No. 6, pp. 3–14 (in Russian).
13. Koneshov V. N., Solovyev V. N., Pogorelov V. V., Nepoklonov V. B., Afanasyeva L. V., Drobyshev M. N., Airborne gravity survey for estimation of regional uncertainties in gravity anomalies derived from modern earth gravitational models, *Geophysical Research*, 2016, Vol. 17, No. 3, pp. 5–16 (in Russian), DOI: 10.21455/gr2016.3-1.
14. <https://www.iss-reshetnev.ru/spacecraft/spacecraft-geodesy/geo-ik2> (in Russian, accessed 16.02.2021).
15. Kuznetsov Yu. G., Kaftan V. I., Bebutova V. K., Serebryakova L. I., Vereshchetina A. V., Modern vertical movements of the earth's surface in the Caspian region, *Geodeziya i kartografiya*, 1997, No. 9, pp. 29–34 (in Russian).
16. Lebedev S. A., Gusev I. V., International experience in calibration of satellite altimetry data on the stationary and temporary calibration sites, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 2, pp. 18–35 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-18-35.
17. Loupian E. A., Matveev A. A., Uvarov I. A., Bocharova T. Yu., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., The satellite service See the Sea — a tool for the study of oceanic phenomena and processes, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 251–261 (in Russian).
18. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2015-12-5-263-284.

19. Meshcheryakov Yu. A., Bulanzhe Yu. D., Vyrzhikovskiy G. E., *Karta sovremennykh vertikal'nykh dvizhenii zemnoi kory Vostochnoi Evropy* (Map of modern Earth's crust vertical movements on Eastern Europe), Moscow: GUGK SSSR, 1971 (in Russian).
20. *Natsional'nyi Atlas Rossii. T. 2. Priroda. Ekologiya* (National Atlas of Russia. Vol. 2. Nature. Ecology), Moscow: PKO "Kartografiya", 2007, pp. 50–51 (in Russian).
21. Pobedonostsev S. V., Vertical movements of the coasts of the seas of the European part of the USSR, In: *Kolebaniya urovnya morei i okeanov za 15 000 let* (Fluctuations in the level of seas and oceans for 15 000 years), P. A. Kaplin, R. K. Klige, A. L. Chepalyga (eds.), Moscow: Nauka, 1982, pp. 93–102 (in Russian).
22. Testoedov N. A., Informatsionnye sputnikovye sistemy v nauke i tekhnike. Nauchnoe soobshchenie na Prezidiume RAN (Information satellite systems in science and technology. Scientific communication at the Presidium of the Russian Academy of Sciences), *Rossiiskaya akademiya nauk*, 21.06.2016, available at: http://www.ras.ru/news/news_release.aspx?ID=a68d60c3-201a-4821-ac0e-88aa2e3d7658 (in Russian, accessed 16.02.2021).
23. <http://www.chinadaily.com.cn/a/201810/25/WS5bd16363a310eff303284866.html> (accessed 16.02.2021).
24. Olesen A. V., Tziavos I. N., Forsberg R., New Airborne Gravity Data Around Crete: First Results from the CAATER Campaign, In: *Gravity and Geoid 2002: Proc. 3rd Meeting Intern. Gravity and Geoid Commission*, I. N. Tziavos (ed.), Thessaloniki: Ziti Editions, 2003, pp. 40–44.
25. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Barker D. M., Wang W., Powers J. G., *A Description of the Advanced Research WRF Version 2* (No. NCAR/TN-468+STR), University Corporation for Atmospheric Research, Boulder: NCAR, 2005, 100 p., DOI: 10.5065/D6DZ069T.