

Оценка точности определения температуры поверхности Каспийского моря по данным MODIS на основе in situ измерений

Бочаров А.В. (1,2,3,4), Костяной А.Г. (2,4,5), Лебедев С.А. (4,6,7),
Гребеников Д.А. (2,8), Кравченко П.Н. (1,2,5)

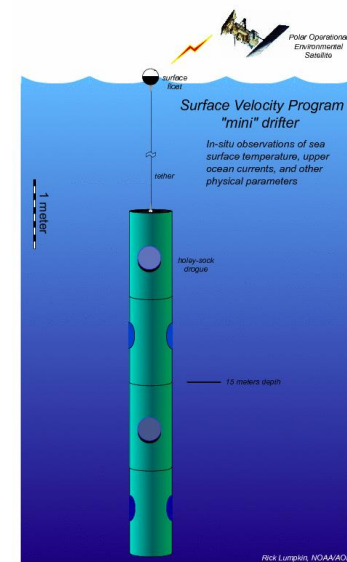
- (1) Тверской государственный университет, Тверь, Россия
- (2) Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
- (3) Институт водных проблем РАН, Москва, Россия
- (4) Майкопский государственный технологический университет, Майкоп, Россия
- (5) Московский университет им. С.Ю. Витте
- (6) Геофизический центр РАН, Москва, Россия
- (7) Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»
- (8) Научно-технологический университет «Сириус», Сириус, Россия



При проведении исследований термогидродинамического режима Каспийского моря многие исследователи поднимали вопрос о точности определения температуры поверхности моря (ТПМ) с использованием данных дистанционного зондирования. Одним из самых востребованных и оперативным способом определение ТПМ является использование данных MODIS, но ошибка получаемых отклонений не известна.

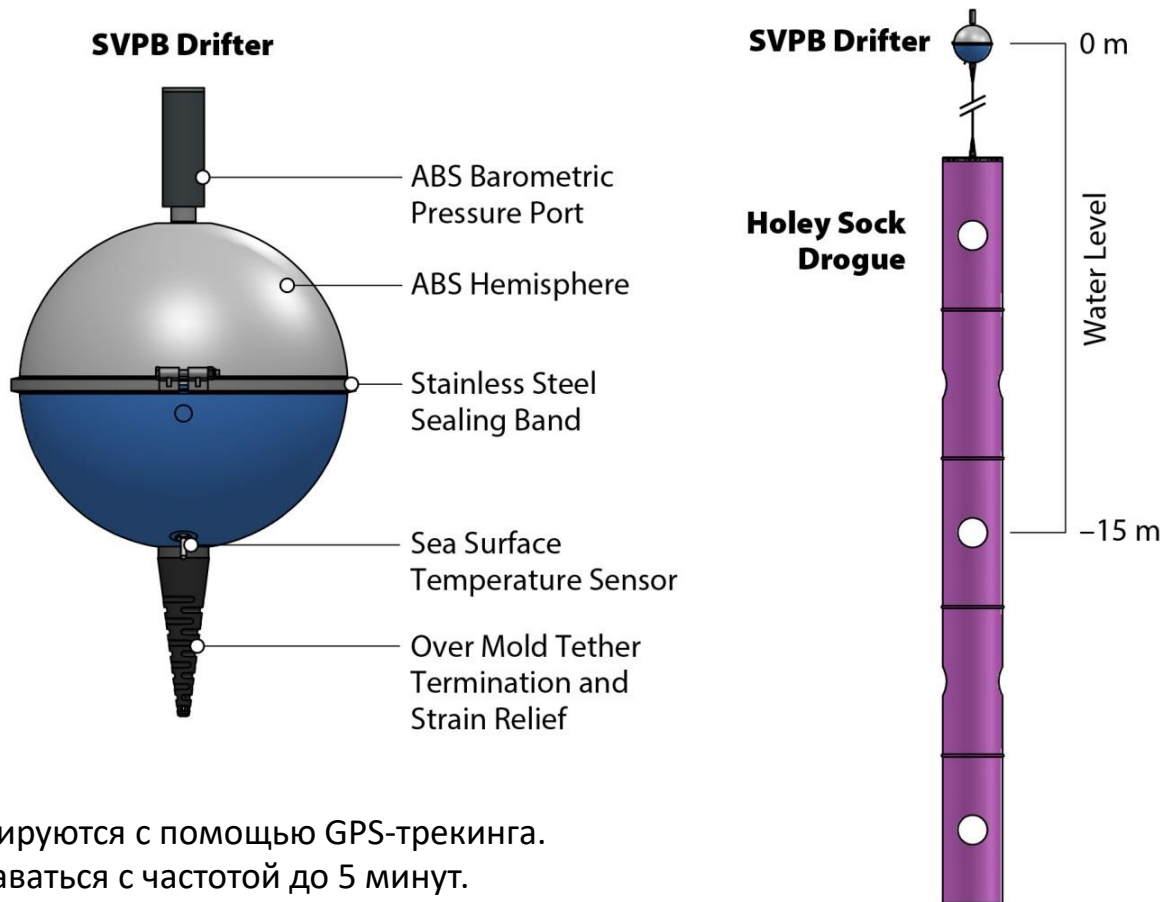


Для оценки точности восстановления ТПМ Каспия по данным MODIS использовались измерения in situ. В 2006 и 2008 годах в Каспийском море были проведены два эксперимента с дрейферами в рамках проекта «Мультидисциплинарный анализ экосистемы Каспийского моря» (MACE) Программы НАТО «Наука ради мира». В экспериментах использовались шесть дрейферов Surface Velocity Program Barometer (SVPB).



Surface Velocity Program Barometer

Корпус дрейфера (SVPB) имеет диаметр 35 см. Дрейфер имеет тормоз, представляющий собой цилиндрическую трубку из прочного нейлона, соединенную с поверхностным буюм стальным тросом. В нижней части поверхностного бую, на 18 см ниже плавучей линии, установлен термистор для измерения температуры поверхности моря (ТПМ). В верхней части сферы находится барометр для измерения давления на уровне моря.



- Перемещения дрейфера регистрируются с помощью GPS-трекинга.
- Данные с дрейфера могут передаваться с частотой до 5 минут.
- Температура поверхности моря определяется с точностью $\pm 0,05$ К.

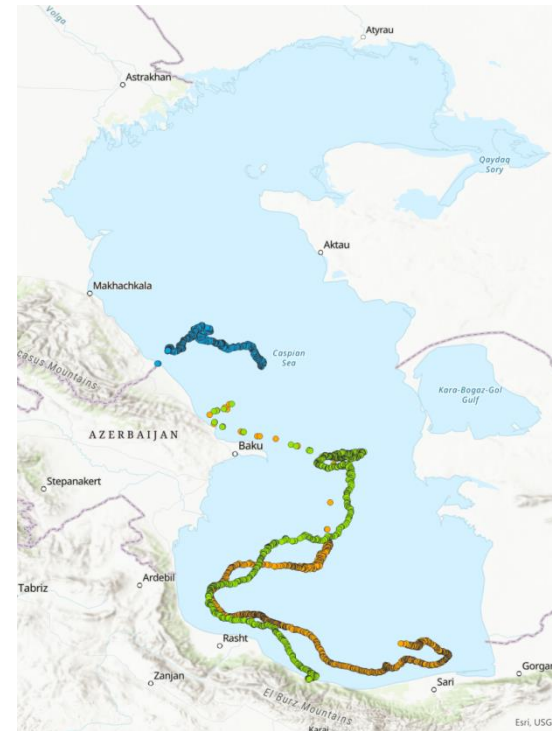


Треки перемещения дрейфтеров в Каспийском море

Данные с шести дрейфтеров были получены за два периода: с 4 октября 2006 года по 20 февраля 2007 года и с 19 июля 2008 года по 10 октября 2008 года. Шесть дрейфтеров выявили особенности циркуляции поверхностных вод в Среднем и Южном Каспии. Одновременно с помощью датчиков шести дрейфтеров было получено 13 095 измерений ТПМ, которые были переданы через спутник в 9 524 сеансах передачи данных с точными координатами местонахождения дрейфтеров на момент связи.



04.10.2006 – 20.02.2007



19.07.2008 – 10.10.2008



Спутники носители спектрорадиометров MODIS

Инструменты MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) размешены на двух спутниках носителях Aqua и Terra



Aqua



Terra



Использованные данные MODIS

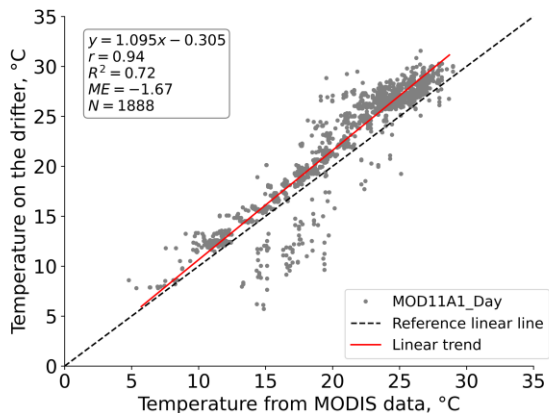
В исследовании оценивались продукты MODIS LST уровня 3 версии 6.1 с пространственным разрешением 1 км, содержащие ежедневные данные о температуре поверхности Земли.

Анализировались продукты, сформированные с использованием алгоритмов Split-Window (MOD11A1 и MYD11A1) и Temperature Emissivity Separation (TES) (MOD21A1D, MYD21A1D, MOD21A1N, MYD21A1N), рассчитанные для дневных и ночных съёмок.

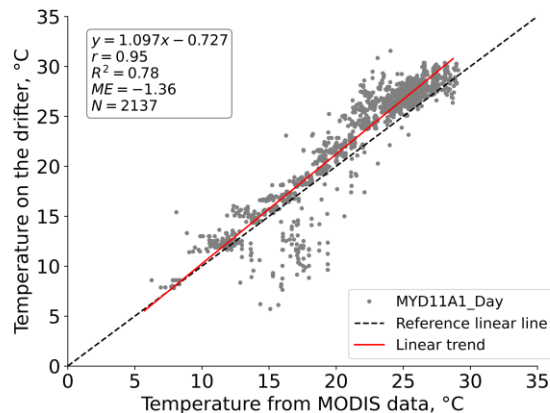
Terra	Aqua
Day and Night (in one dataset)	
MOD11A1.061 Terra Land Surface Temperature and Emissivity Daily Global 1km	MYD11A1.061 Aqua Land Surface Temperature and Emissivity Daily Global 1km
Day	
MOD21A1D.061 Terra Land Surface Temperature and 3-Band Emissivity Daily Global 1km	MYD21A1D.061 Aqua Land Surface Temperature and 3-Band Emissivity Daily Global 1km
Night	
MOD21A1N.061 Terra Land Surface Temperature and 3-Band Emissivity Daily Global 1km	MYD21A1N.061 Aqua Land Surface Temperature and 3-Band Emissivity Daily Global 1km



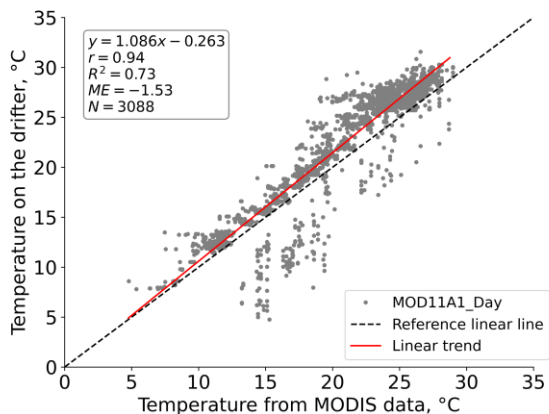
Точность определения ТПМ по дневным данным продуктов MOD11A1 и MYD11A1



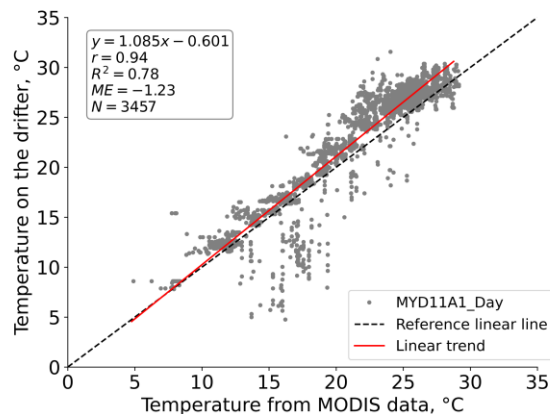
(a)



(b)



(c)

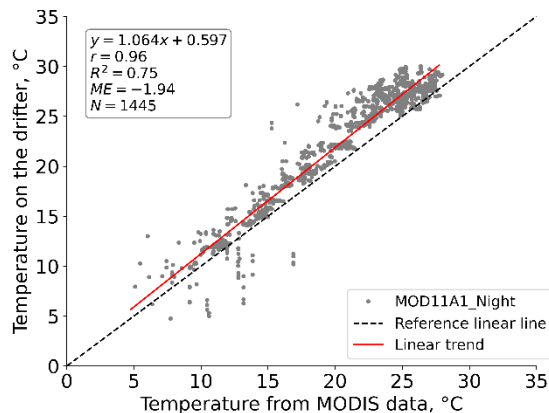


(d)

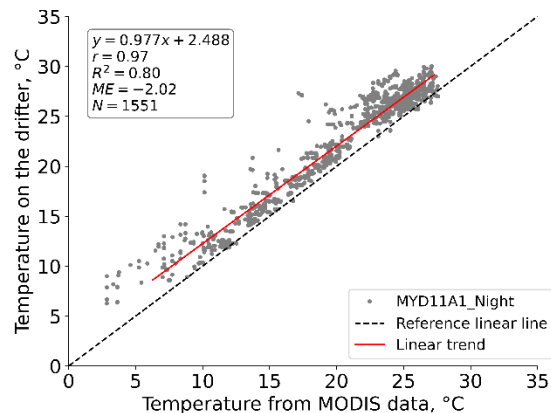
Связь между температурой поверхности моря, полученной по данным дрейферов, и SST по дневным данным MOD11A1 и MYD11A1: (a) Измерения SST, выполненные в соответствующее время суток (сутки), сравниваются с данными продукта MOD11A1; (b) Измерения SST, выполненные в соответствующее время суток (сутки), сравниваются с данными продукта MYD11A1; (c) Измерения SST, выполненные в течение суток (24 часа), сравниваются с данными продукта MOD11A1; (d) Измерения SST, выполненные в течение суток (24 часа), сравниваются с данными продукта MYD11A1.



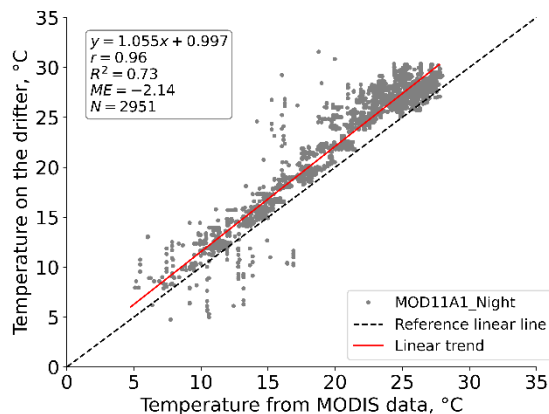
Точность определения ТПМ по ночным данным продуктов MOD11A1 и MYD11A1



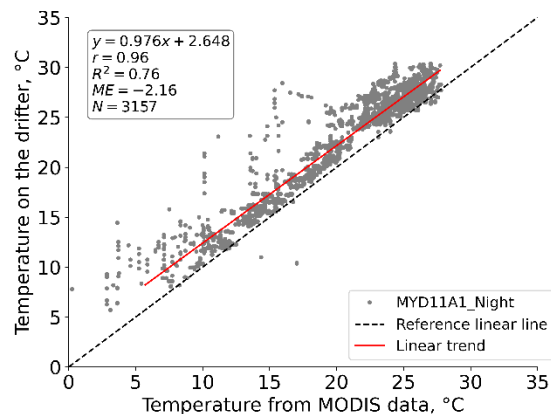
(a)



(b)



(c)

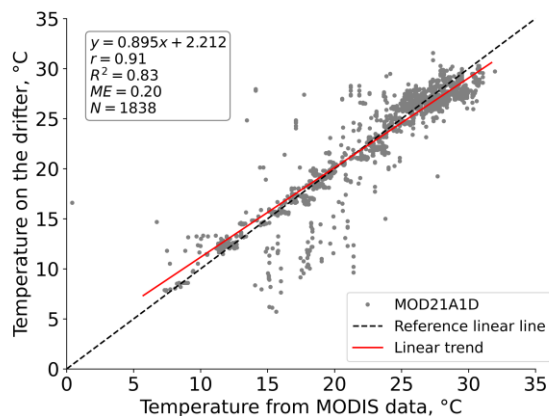


(d)

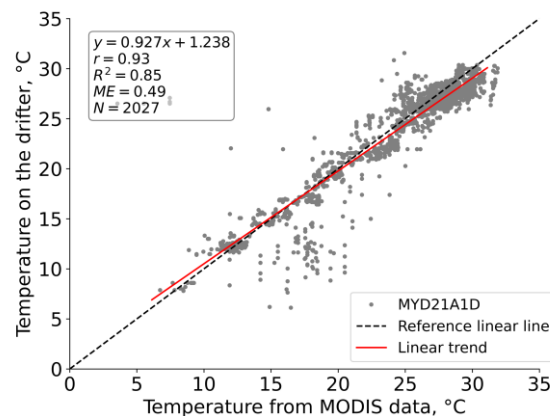
Соотношение между температурой поверхности моря, полученной по данным дрейферов, и SST по ночным данным MOD11A1 и MYD11A1: (a) Измерения SST, выполненные в соответствующее время суток (ночь), сравниваются с данными продукта MOD11A1; (b) Измерения SST, выполненные в соответствующее время суток (ночь), сравниваются с данными продукта MYD11A1; (c) Измерения SST, выполненные в течение суток (24 часа), сравниваются с данными продукта MOD11A1; (d) Измерения SST, выполненные в течение суток (24 часа), сравниваются с данными продукта MYD11A1.



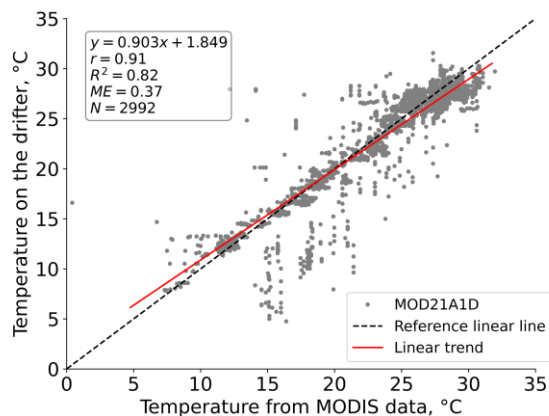
Точность определения ТПМ по дневным данным продуктов MOD21A1D и MYD21A1D



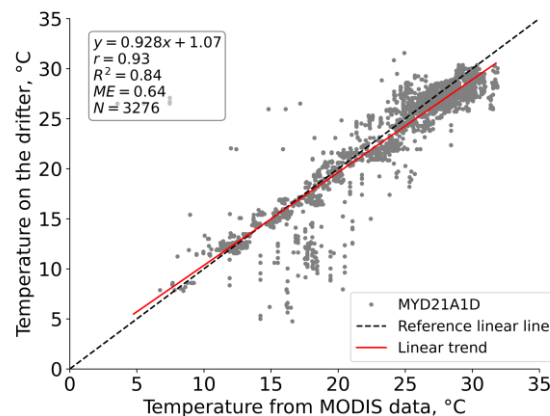
(a)



(b)



(c)

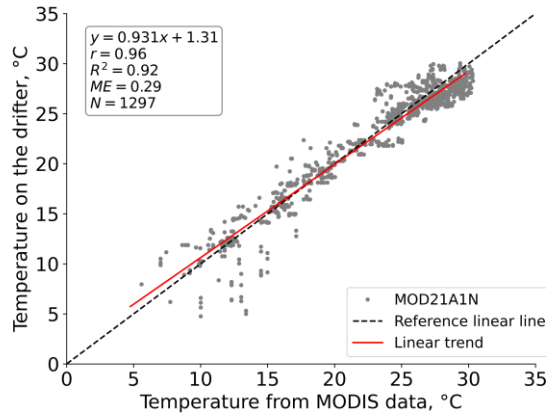


(d)

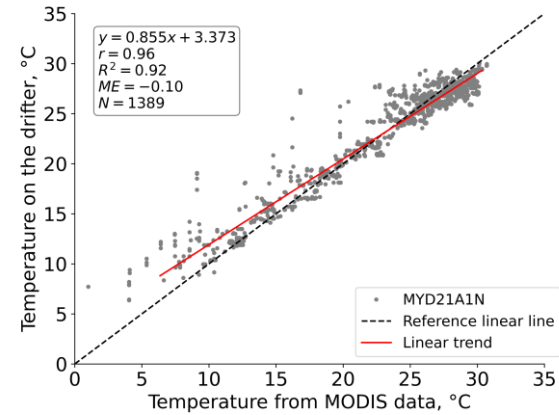
Связь между температурой поверхности моря, полученной по данным дрейферов, и SST по дневным данным MOD21A1D и MYD21A1D: (a) измерения SST, выполненные в соответствующее время суток (сутки), сравниваются с данными продукта MOD21A1D; (b) измерения SST, выполненные в соответствующее время суток (сутки), сравниваются с данными продукта MYD21A1D; (c) измерения SST, выполненные в течение суток (24 часа), сравниваются с данными продукта MOD21A1D; (d) измерения SST, выполненные в течение суток (24 часа), сравниваются с данными продукта MYD21A1D.



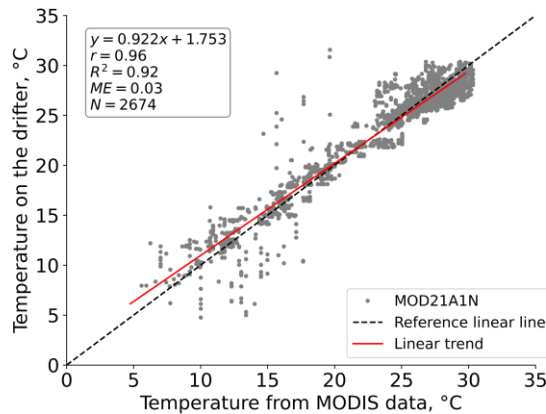
Точность определения ТПМ по ночным данным продуктов MOD21A1N и MYD21A1N



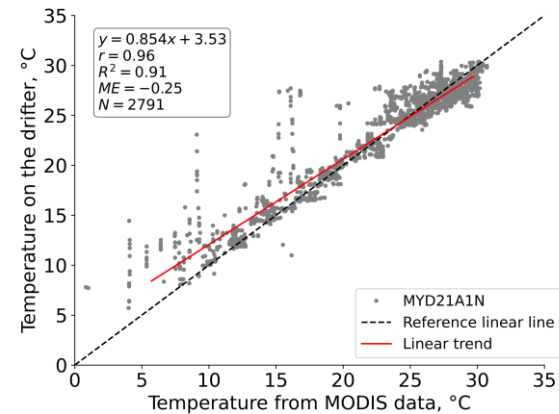
(a)



(b)



(c)



(d)

Связь между температурой поверхности моря, полученной по данным дрейферов, и SST по ночным данным MOD21A1N и MYD21A1N: (a) измерения SST, выполненные в соответствующее время суток (ночь), сравниваются с данными продукта MOD21A1N; (b) измерения SST, выполненные в соответствующее время суток (ночь), сравниваются с данными продукта MYD21A1N; (c) измерения SST, выполненные в течение суток (24 часа), сравниваются с данными продукта MOD21A1N; (d) измерения SST, выполненные в течение суток (24 часа), сравниваются с данными продукта MYD21A1N.



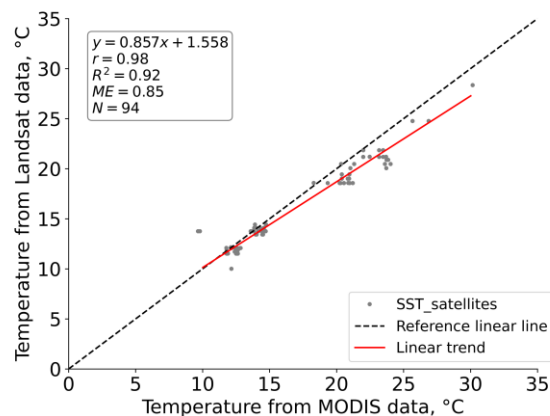
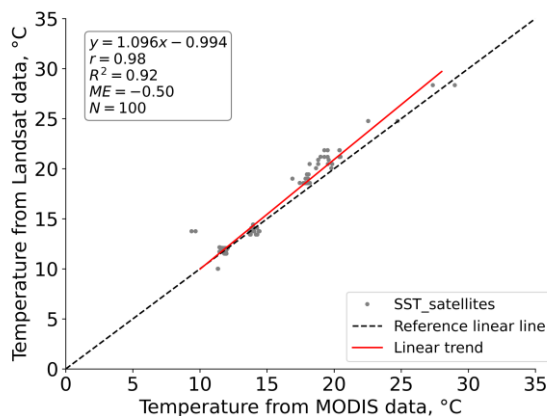
Основные результаты оценки точности определения ТПМ по данным MODIS

Результаты показали существенную линейную связь между спутниковыми данными MODIS и измерениями на дрейферах для всех рассмотренных продуктов. Для продуктов на основе алгоритма Split-Window (MOD11A1 и MYD11A1) коэффициенты корреляции составили 0,94 – 0,96, а коэффициенты детерминации 0,73 – 0,78. Средняя ошибка для дневных данных составила -1,23 – -1,52 °С, а для ночных -2,14 – -2,16 °С. Отмечено, что для дневных данных продуктов MOD11A1 и MYD11A1 отклонение увеличивается с ростом температуры воды.

Продукты на основе алгоритма TES (MOD21A1D, MYD21A1D, MOD21A1N, MYD21A1N), показали более высокую точность. Для дневных продуктов MOD21A1D и MYD21A1D коэффициент корреляции составил 0,91 – 0,93, коэффициент детерминации 0,83 – 0,84, а средняя ошибка 0,37 – 0,64 °С. Для ночных продуктов MOD21A1N и MYD21A1N коэффициент корреляции составил 0,96, коэффициент детерминации 0,91 – 0,92, а средняя ошибка 0,03 – 0,25 °С.



Сравнение данных о температуре поверхности Каспийского моря, полученных с Landsat и MODIS



Сравнение данных о температуре поверхности Каспийского моря, полученных с помощью: (a) Landsat (Уровень 2) и MODIS (MYD11A1 (LST_Day) и MOD11A1 (LST_Day)); (b) Landsat (Уровень 2) и MODIS (MYD21A1D и MOD21A1D)

При сравнение данных MODIS с данными Landsat Level-2 в обоих случаях (для продуктов MODIS, основанных на алгоритмах Split-Window и TES) коэффициент корреляции составил 0,98, а коэффициент детерминации – 0,92. В среднем температура по данным Landsat оказалась выше на 0,5 °C при сравнении с продуктами MYD11A1 и MOD11A1 (дневные) и ниже на 0,85 °C при сравнении с продуктами MYD21A1D и MOD21A1D.



Благодарности

Исследования по получению уравнений регрессии для расчета площади Каспийского моря и залива Кара-Богаз-Гол выполнены при поддержке гранта РФФ N 23-77-00027 «Исследование климатической изменчивости термогидродинамического режима Каспийского моря по данным дистанционного зондирования», <https://rscf.ru/project/23-77-00027/>.

Часть работы, связанная с автоматизацией обработки больших массивов данных ДЗЗ на основе платформы Google Earth Engine с целью выделения границ водных объектов, выполнена в рамках темы № FMWZ-2025-0002 "Исследования процессов формирования качества поверхностных и подземных вод, природных и антропогенных механизмов изменения экологического состояния водных объектов, разработка методов и технологий управления водными ресурсами и качеством вод".



**Спасибо за
внимание!**