

Александр В. Бочаров (1, 2, 3), Андрей Г. Костяной (1, 4, 6), Сергей А. Лебедев (5, 6, 7)



(1) Институт
океанологии РАН



(2) Тверской
государственный
университет



(3) Институт
водных проблем
РАН



(4) Московский
университет им.
С.Ю. Витте



(5) Геофизический
центр РАН



МГТУ
федеральное государственное
образовательное
учреждение высшего образования

(6) Майкопский государственный
технологический университет



(7) Московский институт
электронной техники

СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ КАСПИЙСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ LANDSAT



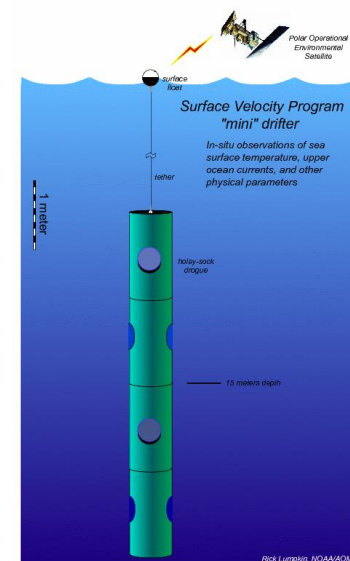
Тринадцатая международная Школа-семинар: «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 23-26 мая 2025 г.
© 2025, Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А.

При проведении исследований термогидродинамического режима Каспийского моря у многих исследователей возникал вопрос точности определения температуры поверхности моря (ТПМ) по данным дистанционного зондирования.

Большое количество вопросов имелось к точности определения ТПМ по данным наиболее продолжительной программы спутниковой съемки Landsat.

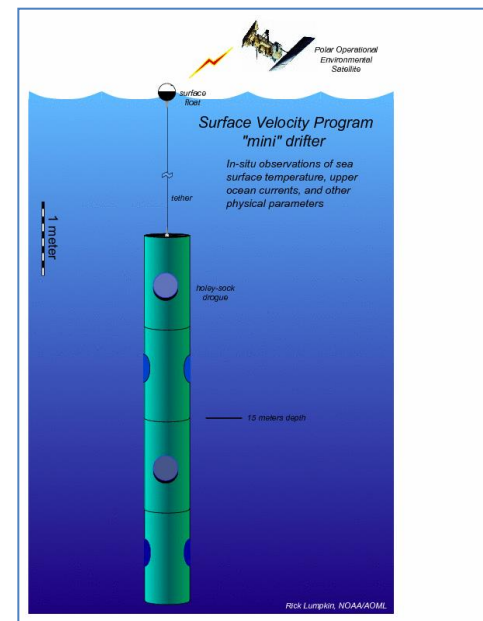
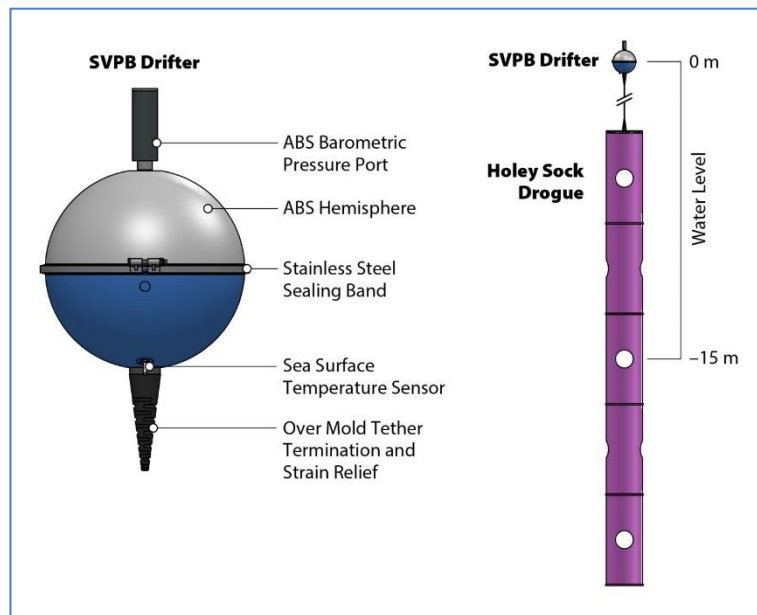


Для оценки точности восстановления ТПМ по данным Landsat были использованы натурные измерения. В 2006 и 2008 годах на Каспийском море были проведены два дрейферных эксперимента в рамках проекта программы НАТО «Наука ради мира» «Мультидисциплинарный анализ экосистемы Каспийского моря» (MACE). В экспериментах использовались шесть дрейферов «Surface Velocity Program Barometer» (SVPB).



Surface Velocity Program Barometer

Корпус дрифтера (SVPB) имеет диаметр 35 см. Тормоз представляет собой цилиндрическую трубку из прочного нейлона, соединенную с надводным буюм стальным тросом. В нижней части надводного бую, на 18 см ниже плавучего каната, установлен термистор, для измерения температуры поверхности моря (SST). В верхней части сферы располагается барометр для измерения давления на уровне моря.



- Перемещения фиксируются при помощи GPS-отслеживания.
- Данные с дрифтера могут передаваться с частотой до 5 минут.
- Температура поверхности моря определяется с точностью $\pm 0,05$ К.



Маршруты перемещения дрейфующих датчиков в Каспийском море



04.10.2006 – 20.02.2007

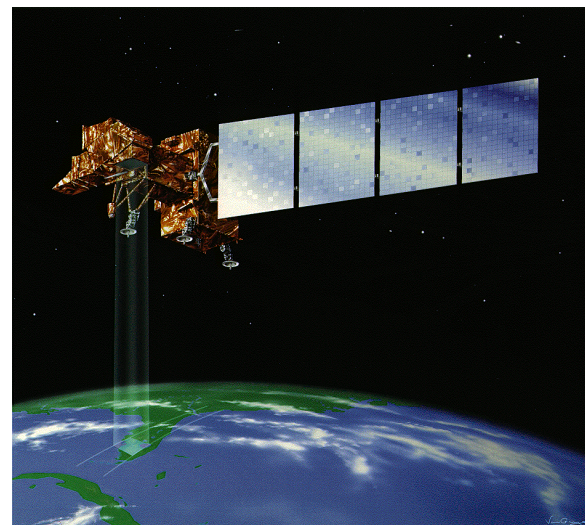


19.07.2008 – 10.10.2008



Данные спутников программы Landsat

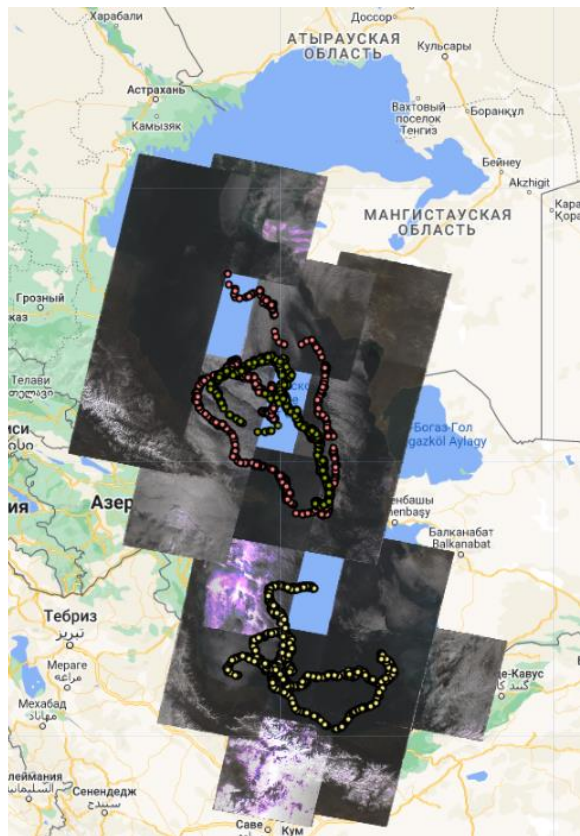
В период проведения измерений дрейфующими датчиками, съемку проводили два спутника из программы Landsat. Это были Landsat-5 проводивший съемку с 1984 по 2012 год, и Landsat-7 работающий с 1999 года (в настоящее время на спутнике имеются технические неполадки и его будущая судьба пока не понятна).



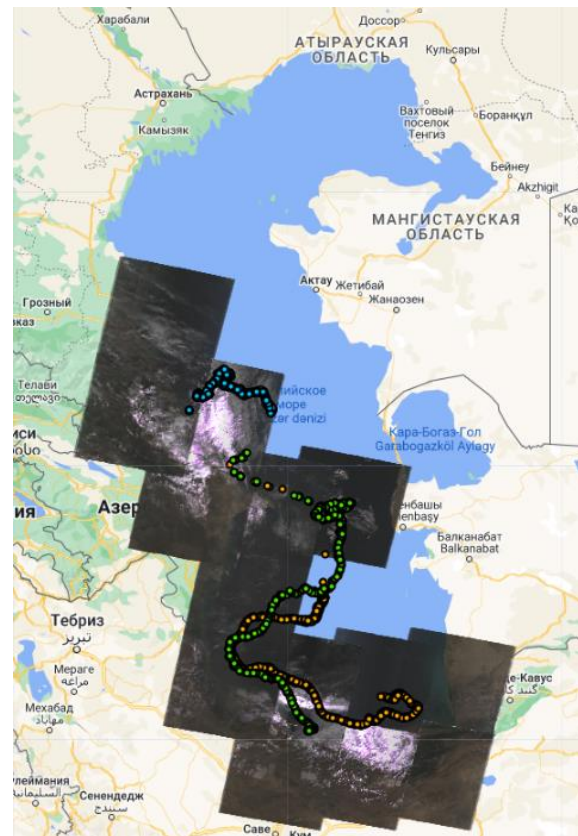
Спутники серии Landsat осуществляют повторный пролет по орбите каждые 16 дней. Район полевых исследований перекрывается 6 треками спутников Landsat.



Мозаика из снимков по трекам пролета сенсоров Landsat-5 и Landsat-7 над районом исследования в период с 19.07.2008 г. по 10.10.2008 г.



04.10.2006 – 20.02.2007



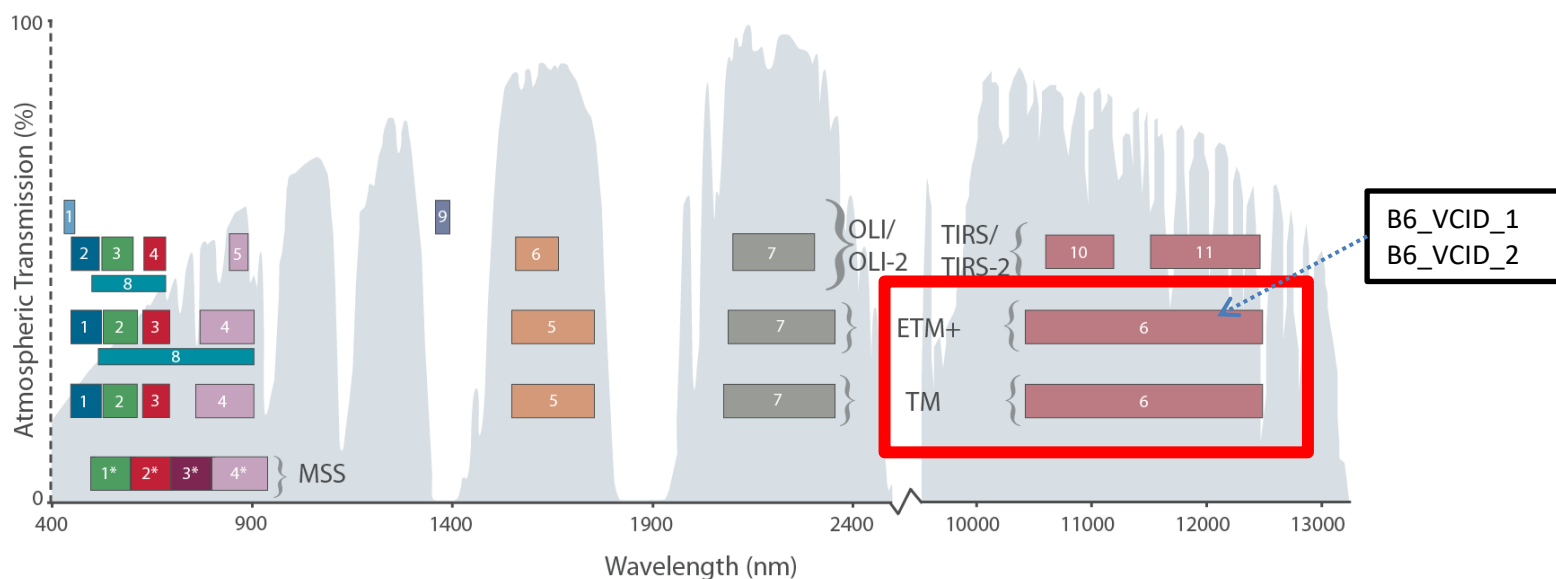
19.07.2008 – 10.10.2008

Всего за исследуемый период над областью перемещения дрейфтеров спутники Landsat провели более 70 пролетов по регулярным трекам сканирования земной поверхности.



Тепловые каналы Landsat

Продукты ДЗЗ характеризующие температуру поверхности генерируется на основе инфракрасного диапазона. Для съемки в инфракрасном диапазоне на спутнике Landsat-5 установлен инструмент Thematic Mapper (TM), а на спутнике Landsat-7 установлен инструмент Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). Оба инструмента работают в спектральной зоне 10,40 – 12,50 мкм. Инструмент TM осуществлял съемку в одном канале, а ETM+ имеет два тепловых канала работающие в одной спектральной зоне (B6_VCID_1 и B6_VCID_2), с немного отличающимися характеристиками.



Обработка тепловых каналов Landsat

Архив Landsat имеет несколько уровней обработки данных. Тепловые каналы продуктов Level-1 содержат значения пикселей, которые по стандартным формулам позволяют рассчитать яркостную температуру, а продукты Level-2 позволяют получить значения скорректированной поверхностной температуры.

Встречается недопонимание в отличии данных тепловых каналов разных уровней Landsat. Иногда исследователи на основе стандартного уравнения получают из данных Level-1 яркостную температуру, и приравнивают её к фактической поверхностной температуре.

Требуют от пользователей предоставления входных данных и калибровочных коэффициентов, которые обычно недоступны.

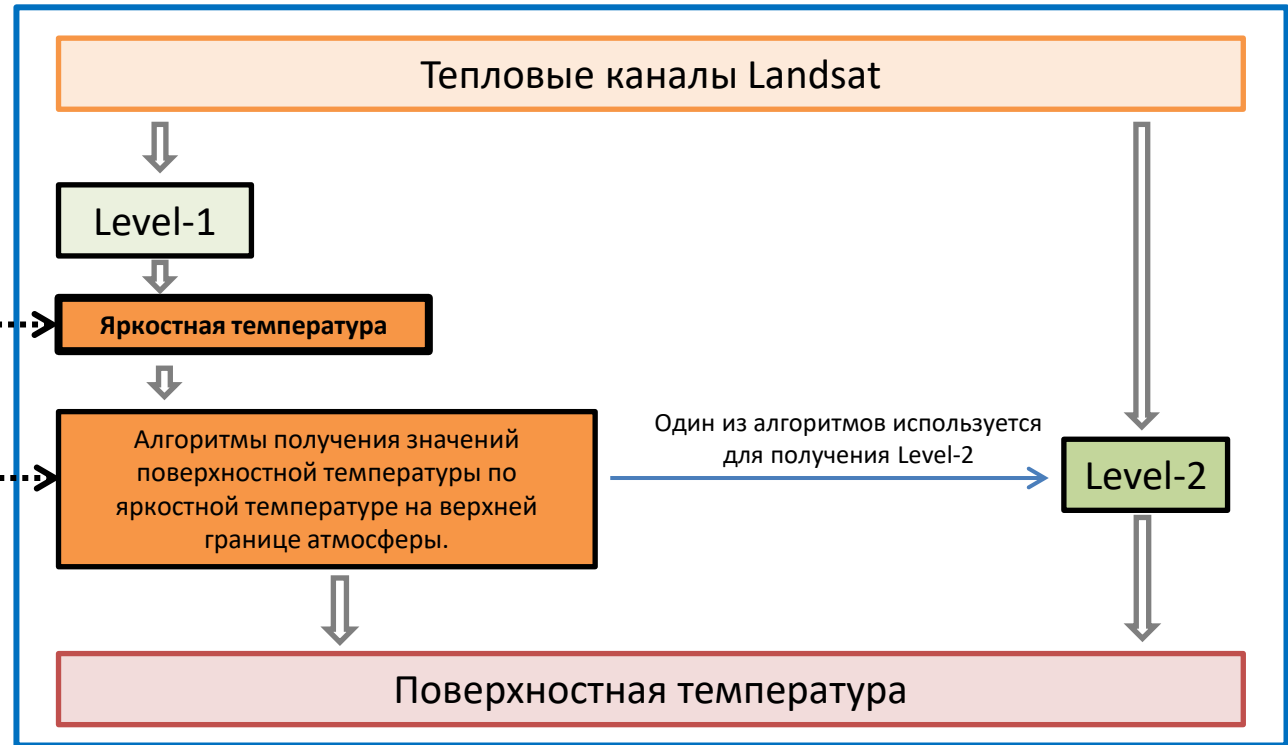


Схема использования тепловых каналов Landsat



Имеющиеся вопросы к точности определения ТПМ по данным Landsat

Level-1

Яркостную температуры по данным Level-1 приравниваю к фактической поверхностной температуре по следующим причинам

Встречается недопонимание в отличии данных тепловых каналов разных уровней Landsat.

Водные объекты приравнивают к абсолютно черному телу, а влияние атмосферы не учитывают. Это может использоваться для получения температуры водной поверхности в первом приближении

Level-2

В данных Landsat Level-2 содержится поверхностная температура, полученная путем использования алгоритма разработанного Рочестерским технологическим институтом [Cook, 2014].

Алгоритм основан на погодных данных Североамериканского регионального реанализа (NARR). Создателями алгоритма проводились исследования по оценки точности определения температуры водной поверхности, но они были выполнены только на водоемах Северной Америки.

В связи с выше сказанным возникает следующие вопросы к точности определения ТПМ по данным Landsat:

- 1) Неизвестна даже примерная ошибка определения ТПМ при использовании яркостной температуры полученной по Landsat Level-1
- 2) Алгоритм получения поверхностной температуры используемый в Landsat Level-2 разработан для Северной Америки поэтому требует уточнения для Каспийского моря.

С целью получения ответа на эти вопросы было принято решение провести анализ точности определения температуры в обоих случаях.

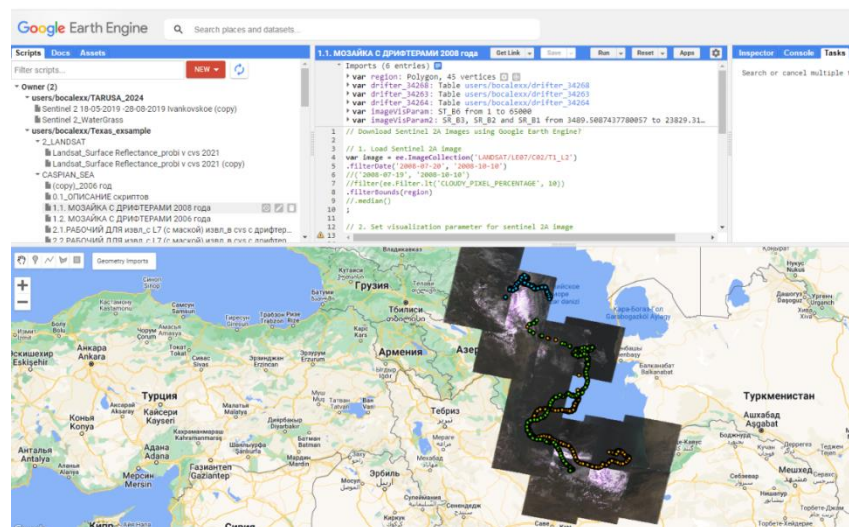


Обработка данных.

Для получения данных дистанционного зондирования, фильтрации пикселей снимков и извлечения значений пикселей соответствующих подспутниковым измерениям, использовалась платформа **Google Earth Engine**



Google Earth Engine

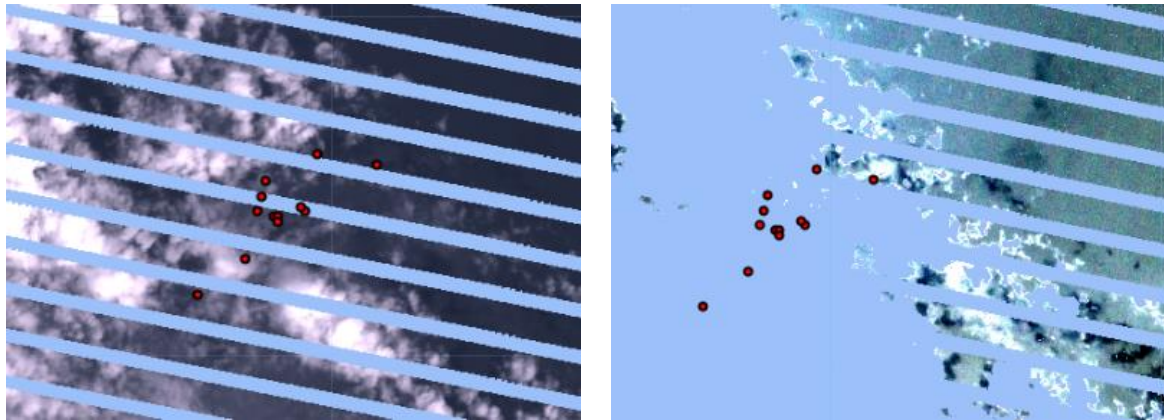


Дрифтеры проводили измерения температуры приповерхностного слоя моря каждый час. Приблизительное усредненное время пролета спутника над акваторией Каспийского моря 07:08:00 GMT+1 (по Гринвичу). Поэтому для сравнения с температурой, полученной, по данным ДЗЗ отбирались показания дрейфтеров наиболее близкие к моменту пролета спутника. Однако анализ данных показал, что изменения температуры воды дрейфтерами не имеют значительных суточных колебаний, поэтому для расширения количества контрольных точек дополнительно были оценены все наблюдения за день, а не только более близкие к моменту пролета спутника над акваторией.



Наложение маски облачности

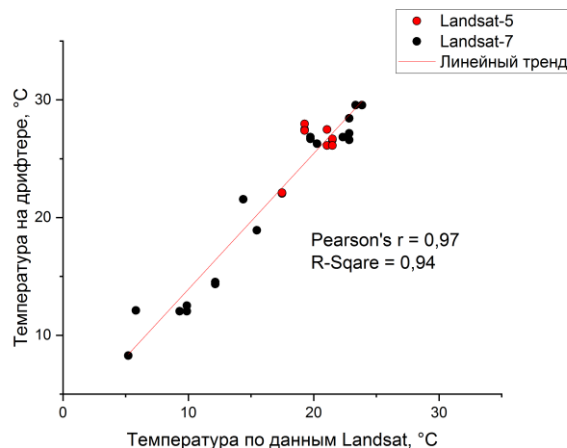
За период нахождения в море дрейфтеры передали несколько тысяч измерений и соответствующих им координат. Для анализа точности определения ТПМ Каспийского моря по данным Landsat, необходимо было вычлнить из этого массива данных подспутниковые измерения, не перекрытые облачностью на космических снимках. Продукты Landsat имеют канал оценки качества пикселей. На основе использования битовой маски в канале QA_PIXEL снимков Landsat, были выделены точки измерений в областях отсутствия облачности



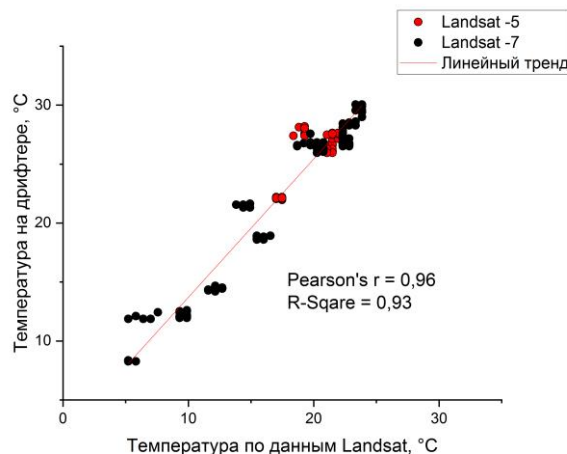
**Примеры использования маски облачности (снимок 29.07.2008 г.)
(на момент пролета спутника все точки измерений за день перекрыты облаками)**



Точность определения ТПМ по данными Landsat Level-1



а

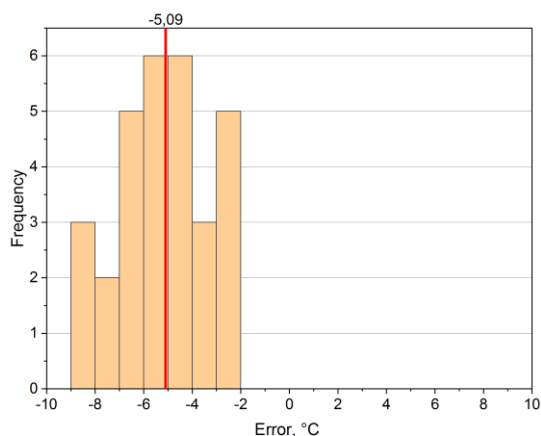


б

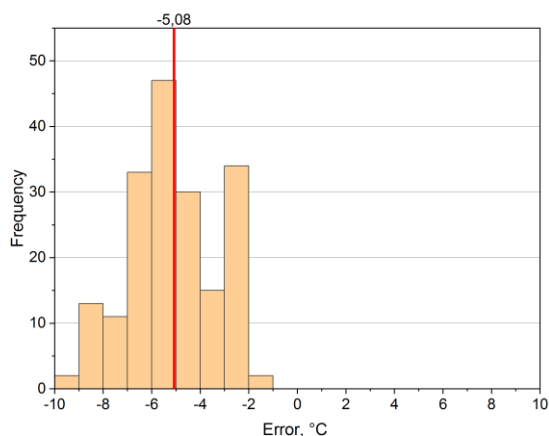
Высокая статистическая связь измерений с дрейфтеров и яркостной температуры на верхней границе атмосферы

Зависимость между температурой приповерхностного слоя моря полученной с дрейфтеров и ТПМ по данным Landsat-5,7 Level-1

а) измерения, имеющие временную разницу не более двух часов с пролетом спутника; б) все измерения на день пролета спутника



а



б

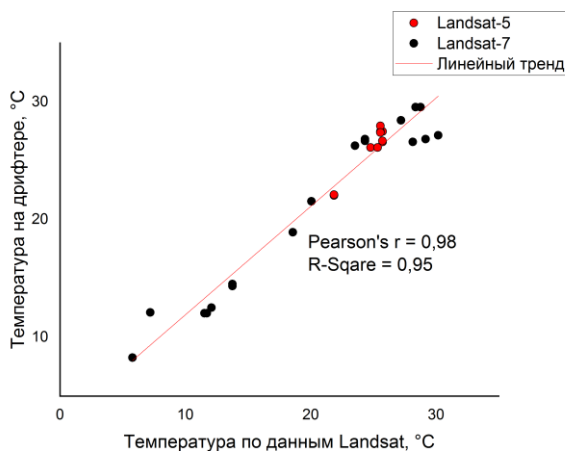
Результат
По данным Landsat Level-1 получаем температуру заниженную на 5,1 °C

Гистограмма значений ошибок определения температуры по данным Landsat Level-1

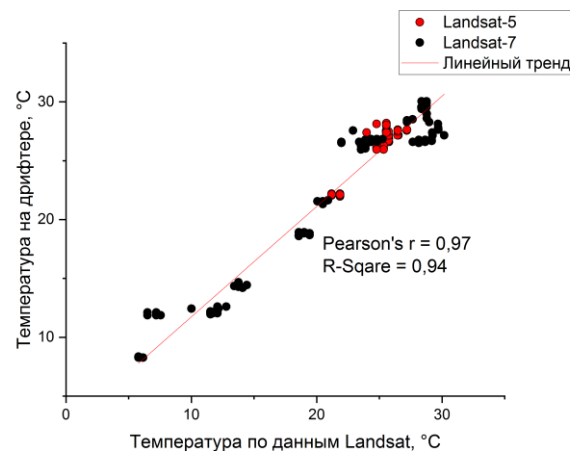
а) измерения, имеющие временную разницу не более двух часов с пролетом спутника; б) все измерения на день пролета спутника



Точность определения ТПМ по данными Landsat Level-2



а

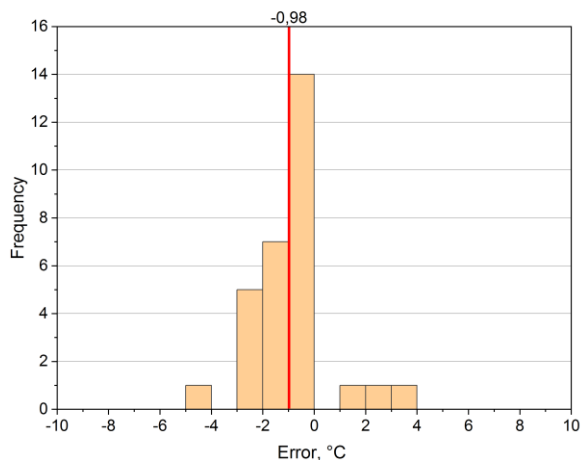


б

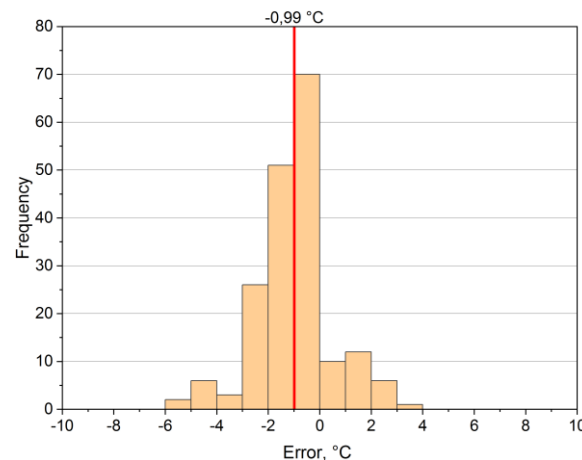
Высокая статистическая связь измерений с дрейферов и поверхностной температуры по данными Landsat Level-2

Зависимость между температурой приповерхностного слоя моря полученной с дрейферов и ТПМ по данным Landsat-5,7 Level-2

а) измерения, имеющие временную разницу не более двух часов с пролетом спутника; б) все измерения на день пролета спутника



а



б

Результат
По данным Landsat Level-2 получаем температуру заниженную на 1 °C

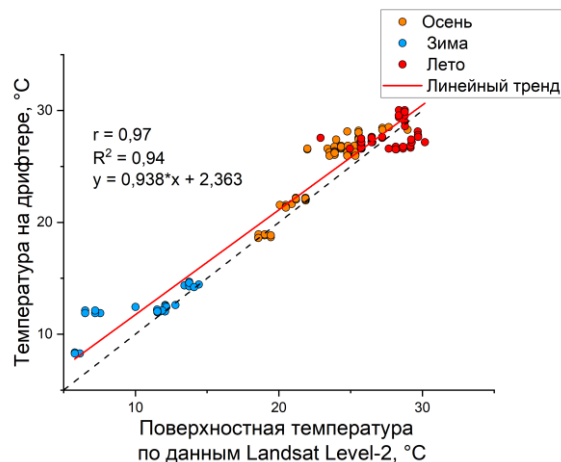
Гистограмма значений ошибок определения температуры по данным Landsat Level-2

а) измерения, имеющие временную разницу не более двух часов с пролетом спутника; б) все измерения на день пролета спутника



Межсезонные вариации точности определения температуры поверхности воды Каспийского моря по данным спутников LANDSAT Level-2

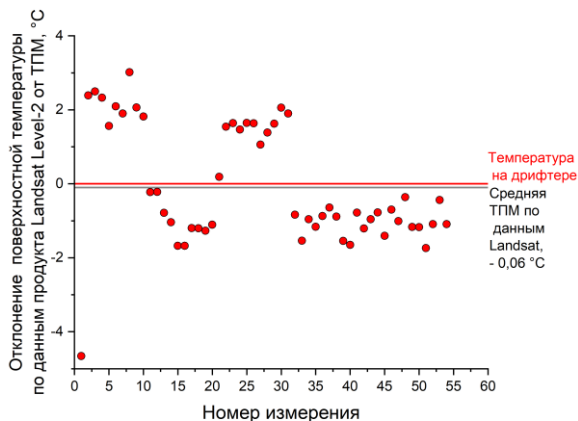
При анализе измерений поверхностная температура по данным Landsat Level-2 в летние месяцы оказалась незначительно ниже фактической температуры поверхности моря (ТПМ) на 0,06°C. В зимние месяцы поверхностная температура по данным Landsat Level-2 также оказалась ниже фактической ТПМ, но ошибка составила 1,24°C.



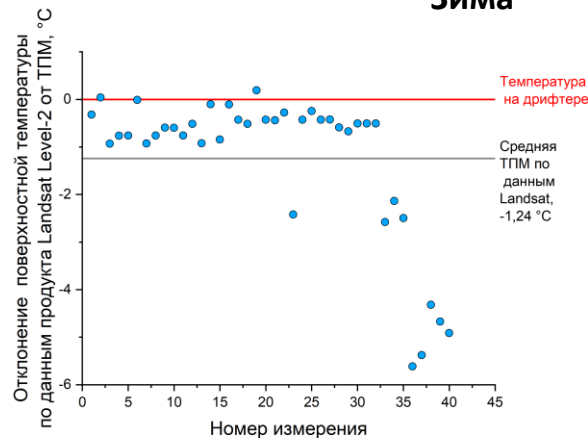
Лето

Зима

Результат
По летним данным Landsat Level-2 получаем температуру близкую к фактической

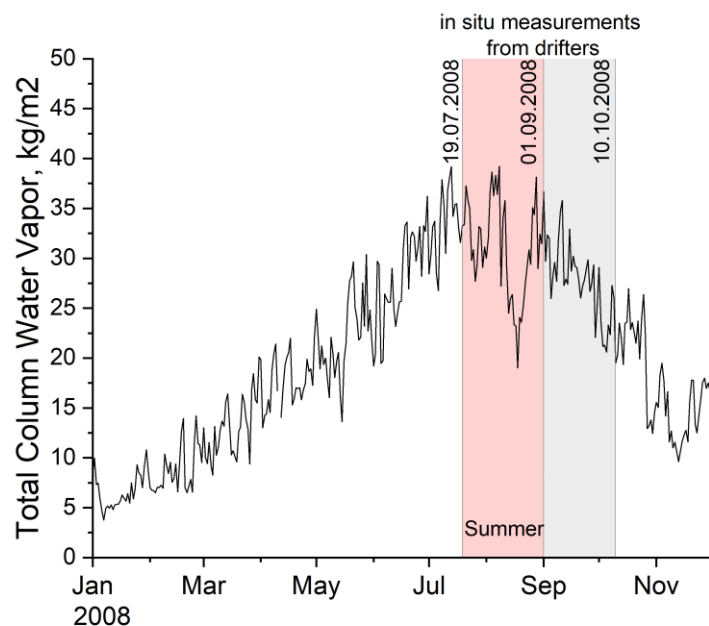


Результат
По зимним данным Landsat Level-2 получаем температуру заниженную на 1,24 °C

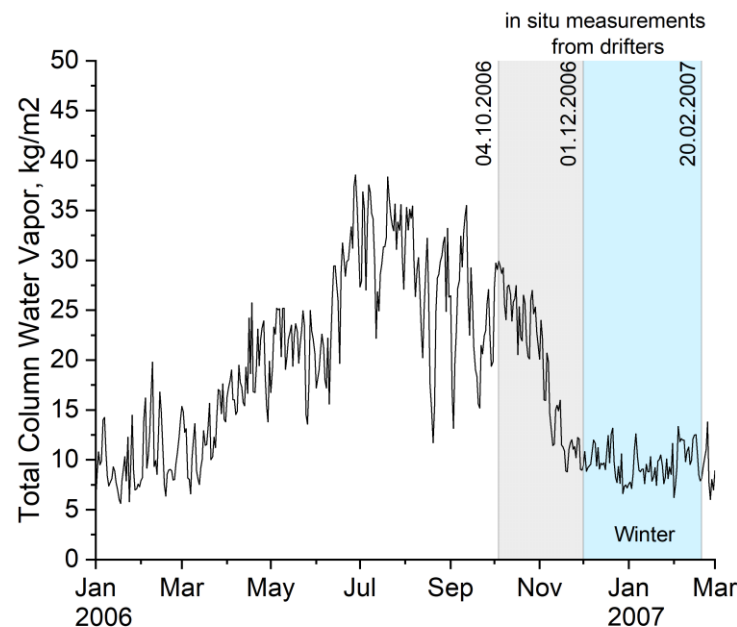


Количество водяного пара в атмосфере над регионом исследования

Лето



Зима



Выводы

1. Результаты исследования позволяют рекомендовать для оценки ТПМ использовать данные продукта Landsat Level-2 из доступной сейчас Collection 2. При использовании следует учитывать, что преимущественно значения температуры подстилающей поверхности по данным Landsat будут ниже фактической температуры воды.
2. Результаты исследования показали, что использование нескорректированных данных Landsat Level-1 не желательно. При этом не обязательно использовать данные Level-2, так как существуют альтернативные алгоритмы обработки Level-1.
3. По результатам проведенных исследований для Каспийского моря, для данных полученным из продукта Landsat Level-2, рекомендуется использовать поправку в 1,24°C для зимних месяцев.
4. Можно предположить, что основным фактором изменения точности определения температуры по данным Landsat Level-2 является калибровка алгоритма, которая адаптирована под состояние атмосферы в среднем температурном диапазоне. Полученные результаты позволяют сказать, что алгоритм получения поверхностной температуры по данным Landsat Level-2 достаточно хорошо работает для вод с температурой 12–22 °C.



Исследования по уточнению алгоритмов расчета температуры поверхности моря (ТПМ) по данным продуктов Landsat выполнены при поддержке гранта РНФ 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 ДДЗ на основе платформы Google Earth Engine с целью разработки новых методических подходов к оценке гидроэкологического статуса водного объекта, 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".

