

Оценка среднемесячных температур озера Байкал в бесснежный период с использованием многовременных данных Landsat LST и MODIS/Terra LST

Е.А.Мамаш, И.А.Пестунов

**Федеральный исследовательский центр информационных и
вычислительных технологий**

2023

Обоснование актуальности исследования

- **Температура воды** является одним из ключевых свойств водных объектов. Традиционные методы регистрации температуры, основанные на измерении *in situ* носят точечный характер, и часто не являются репрезентативными для таких сложных и динамических экосистем как озера. Уже много лет данные о температуре поверхности озер собираются с помощью дистанционного зондирования [*Birk et al, 2014; Dyba et al, 2022*].
- В ряде исследований показано, что корреляция между температурой воды измеренной *in-situ* и ее оценкой по спутниковым достаточно высока (коэффициент детерминации больше 0.9). Также показано, что одними из наиболее эффективных в оценке температуры являются серии спутниковых данных Landsat LST (**Land Surface Temperature**) и MODIS LST [*Prats et al, 2018; Song et al, 2016*]. Если данные MODIS позволяют сделать общую оценку температуры водной поверхности акватории большого по площади водоема (пространственное разрешение данных 1000 м), то данные Landsat вследствие более высокого пространственного разрешения (100 м) позволяют решать задачи анализа температуры небольших водоемов или более подробно исследовать характер распределения температурного поля части акватории большого водоема, например температуры прибрежной зоны.

Особенности температурного режима озера Байкал

- Наземные исследования показали, что распределение температуры воды по акватории Байкала носит неравномерный характер. Её максимальные значения отмечаются в августе, составляя в открытых районах озера 8–11 °С. У берегов она повышается, достигая 15–16 °С. Отопляющее влияние на воды прибрежных участков оказывает тепловой сток крупных и средних рек. В связи с этим температура воды в придельтовых участках рек может превышать 20 °С.
- Наиболее полные исследования, посвященные изучению температуры вод Байкала, были выполнены Л. Л. Россолимо и опубликованы в 1957 г. в книге «Температурный режим озера Байкал» [Россолимо, 1957]. В ней обобщен огромный объем материалов наблюдений за температурой воды в озере, дан критический анализ всех предыдущих работ, посвященных этой тематике.
- В работах Е.Н. Сутыриной [Сутырина, 2016; Сутырина, 2017] изучались особенности распределения температуры на поверхности оз. Байкал в период открытой воды с применением данных радиометра AVHRR на основе отдельных снимков, в ходе работы изучена внутригодовая и межгодовая изменчивость в распределении температуры поверхности оз. Байкал и выявлено, что наибольшая межгодовая изменчивость температуры на его поверхности наблюдается в августе, который характеризуется наибольшим прогревом поверхности озера.

Спутниковые данные и алгоритмы

- В работе использованы ряды дневных данных Landsat 8 LST (Land Surface Temperature) и MODIS LST (MOD11A1) за период 2013 - 2022 гг. Доступ к этим данным осуществляется через сайт Геологической службы США (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov>). В последние годы все большую популярность приобретает также облачная платформа Google Earth Engine (GEE), обеспечивающая не только доступ к данным, но и обработку их больших временных серий.
- MOD11A1 является готовым продуктом, полученным на основе данных MODIS/Terra. При расчете LST по данным Landsat нужно учитывать, что не существует как единого общепринятого метода радиометрической и атмосферной коррекции снимков, так и единого алгоритма учета излучательной способности земной поверхности (коэффициента эмиссии).
- **Геологическая служба США (USGS)** в рамках создания научных продуктов (Science products) второго уровня (**L2SP**) начала выпуск оперативного продукта LST (L8_ST и L9_ST), получаемого на основе данных Collection 2 Level-1 [Cook et al, 2014]. Этот продукт основан на решении уравнения радиационного переноса, примененном к микроволновому диапазону (L8,9/TIRS). Для реализации процедуры атмосферной коррекции в данном случае используются данные Североамериканского регионального реанализа (NARR), а для выполнения расчетов радиационного переноса используется программа MODTRAN.
- Коррекция излучательной способности для этого продукта основана на данных **Aster Global Emissivity Dataset** [Hulley et al, 2015], которые, в свою очередь, используют значения вегетационного индекса ASTER NDVI. Покрытие данными **Aster-GED** на территории России обладает рядом пробелов и может быть использовано далеко не всегда. Коллекция данных L2 также представлена в системе доступа и обработки спутниковых данных Google Earth Engine (GEE).
- S. Ermida [Ermida et al, 2020] предложен алгоритм подсчета LST для данных серии спутников Landsat, начиная с Landsat 4 в системе GEE. К недостаткам этого алгоритма можно отнести необходимость использования данных Aster-GED для вычисления коэффициента эмиссии.

Валидация спутниковых данных

- Валидация продуктов Landsat 8 LST и MODIS LST обычно проводится на основе наземных измерений (in situ). Результаты валидации продукта MOD11A1, приведенные в работах [Guo et al, 2022; Crosman et al, 2009; Hulley et al., 2011; Reinart et al, 2008] показывают, что разница между спутниковыми и наземными данными составляет примерно 0.8–1.9°C, а сдвиг –1.74 °C [Song et al., 2016] и –1.4°C [Zhang et al., 2014].
- Валидация данных MODIS нами проводилась летом 2021 г. на территории Предсалаирской равнины в Новосибирской области. Наземные данные получены с использованием автоматизированных регистраторов температуры DS-1921 “Thermochron”, которые фиксировали приземную температуру с 09.06.2021 г. по 20.09.2021 г. Датчики располагались в точках, где влияние рельефа поверхности было сведено к минимуму и поверхность можно считать однородной. Коэффициент корреляции данных составил более 0.78.
- Результаты валидации продукта L2SP показывают наличие систематической ошибки [Galve et al, 2022; Dyba et al, 2022], в большинстве случаев в сторону завышения спутниковых данных по сравнению с наземными. В работе [Dyba et al, 2022] предложена формула для коррекции значений продукта L2 применительно к водным объектам.
- Нами предложена **модификация алгоритма вычисления Landsat LST**, исходя из исследований J.A. Sobrino [Sobrino, 2008] и получен альтернативный продукт **L2_mod**, не зависящий от покрытия территории России данными ASTER GED. Валидация алгоритма выполнена на основе наземных данных за период 17.07.22-27.10.2022 гг. на территории Чуйской котловины, отмечено наличие высокой корреляции наземных и спутниковых данных ($R > 0.98$) [Мамаш Е.А. и др., 2023].
- Валидация LST применительно к водным объектам проводилась в период 12.09.2023 - 16.09.2023 гг. в акватории Обского водохранилища. Показано, что разница измерений in situ и спутниковых данных в среднем колеблется в пределах 1°C.

Модификация алгоритма вычисления LST

1. Коэффициент эмиссии подсчитывается на основе значения FVC :

$$FVC = \left(\frac{NDVI - NDVI_{bare}}{NDVI_{veg} - NDVI_{bare}} \right)^2$$

Здесь $NDVI_{bare}$ и $NDVI_{veg}$ - это пороговые значения, соответствующие голой почве и почве, полностью покрытой растительностью. В нашем случае эти значения равны 0.2 и 0.86. [Ermida et al, 2020; Jiménez-Muñoz, et al, 2009].

2. Исходя из значений FVC , значения эмиссии поверхности могут быть получены на основе так называемого метода “растительного покрова” [Rubio et al, 1997, Caselles et al, 1997] и вычисляются как

$$\varepsilon_b = FVC \varepsilon_{b,veg} + (1 - FVC) \varepsilon_{b,bare}$$

где $\varepsilon_{b,veg}$ и $\varepsilon_{b,bare}$ - излучательная способность поверхности, полностью покрытой растительностью и голой почвы соответственно для данного спектрального канала b . В алгоритме, предложенном в [Ermida et al, 2020] значение считается постоянным и равным 0.99, тогда как значения $\varepsilon_{b,bare}$ вычисляются на основе данных ASTER GEDv3.

Альтернативный алгоритм подсчета эмиссии, описанный J.A. Sobrino [Sobrino, 2008]:

$$\varepsilon_b = \begin{cases} \varepsilon_{b,bare}, & NDVI < NDVI_{bare} \\ FVC \varepsilon_{b,veg} + (1 - FVC) \varepsilon_{b,bare}, & NDVI_{bare} \leq NDVI \leq NDVI_{veg} \\ \varepsilon_{b,veg}, & NDVI > NDVI_{bare} \end{cases}$$

где $\varepsilon_{b,bare}$ - постоянная и равная 0,97. Это значение получено, исходя из ряда исследований [Li et al, 2013, Dash et al, 2005]. Водные поверхности выделяются на основе битовых масок и коэффициент эмиссии для таких объектов берется постоянным, равным 0.99.

3. LST вычисляется на основе алгоритма SMW (Statistical Mono-Window) [Duguay-Tetzlaff, 2015], где кроме данных LST и эмиссии используются атмосферные данные реанализа National Center for Environmental Prediction (NCEP) и National Center for Atmospheric Research (NCAR), доступные в GEE. В результате модель представляет собой линеаризацию уравнения радиационного переноса, в котором сохраняется явная зависимость от излучательной способности [Ermida et al, 2020]:

$$LST = A_i \frac{T_b}{\varepsilon} + B_i \frac{1}{\varepsilon} + C_i,$$

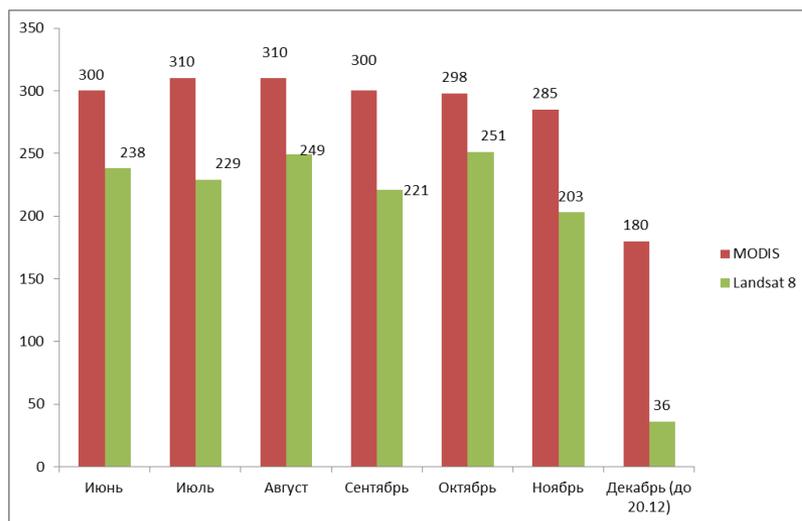
где T_b – яркостная температура Landsat 8 TOA в канале TIR, ε – излучательная способность поверхности для того же канала, коэффициенты A_i, B_i, C_i получаются при построении моделей радиационного переноса на основе набора данных профилей температуры воздуха, водяного пара и озона.

Цели исследования

- Построение температурных карт акватории оз. Байкал на основе спутниковых данных разного пространственного разрешения (MODIS LST и Landsat LST) и различных алгоритмов (L2SP и L2_mod).
- Вычисление и сравнительный анализ основных статистических показателей (среднее, стандартное отклонение MBE (mean bias error)) полученных распределений LST.
- Анализ многолетней динамики среднемесячной температуры оз. Байкал в бесснежный период.

Количество обработанных снимков (N)

N	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь (до 20.12)
MODIS	300	310	310	300	298	285	180
Landsat 8	238	229	249	221	251	203	36

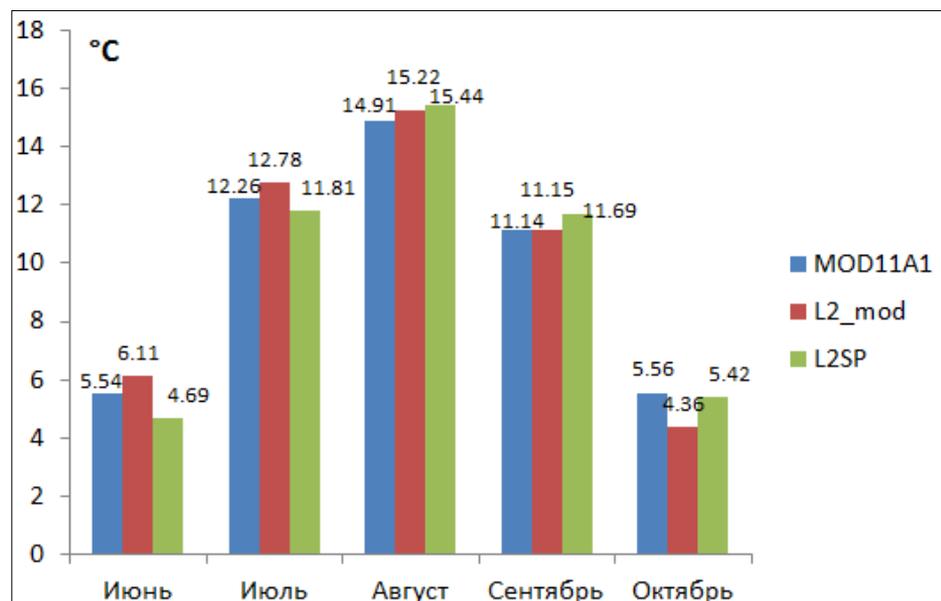


В ноябре и декабре (до 20.12, когда начинается ледостав) качество и количество снимков Landsat резко снижается из-за погодных условий и облачности, поэтому сравнительный анализ будем проводить с июня по октябрь включительно, чтобы исключить значимые статистические погрешности. Данных MODIS для всех указанных периодов достаточно для построения карт температурных полей и анализа динамики.

Результаты оценки среднемесячных температур оз. Байкал

Среднемесячные значения LST за 2013-1022 гг.

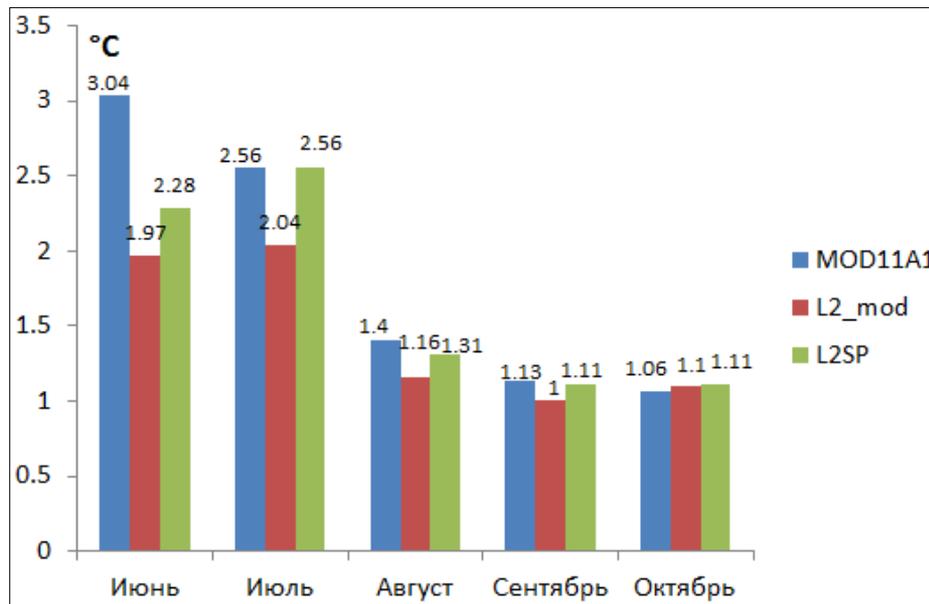
Mean LST, °C	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
MOD11A1	5.54	12.26	14.91	11.14	5.56
L2_mod	6.11	12.78	15.22	11.15	4.36
L2SP	4.69	11.81	15.44	11.69	5.42



Средние значения температур, вычисленные на основе трех алгоритмов с июня по октябрь в большинстве случаев отличаются менее, чем на градус, максимальное отличие приходится на июнь и октябрь, а минимальное на сентябрь, что можно связать с природно-климатическими факторами и разным пространственным разрешением.

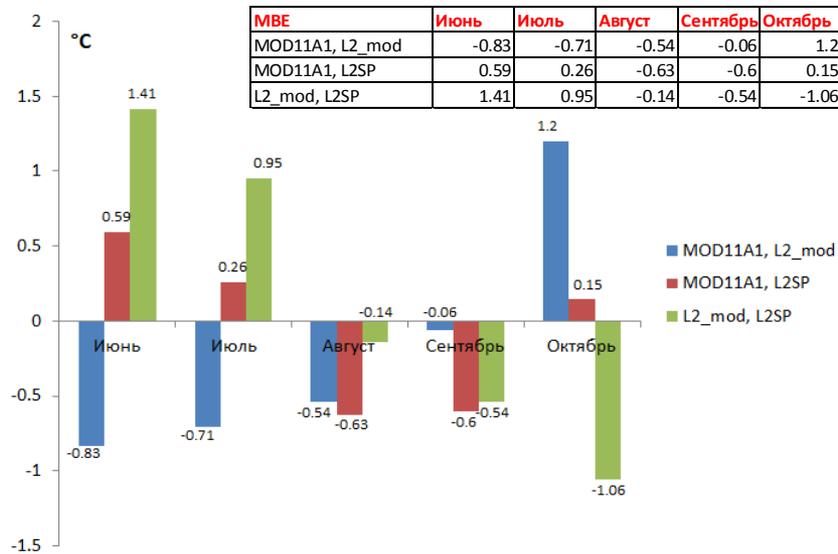
Среднемесячные стандартные отклонения

σ	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
MOD11A1	3.04	2.56	1.4	1.13	1.06
L2_mod	1.97	2.04	1.16	1	1.1
L2SP	2.28	2.561	1.31	1.11	1.11

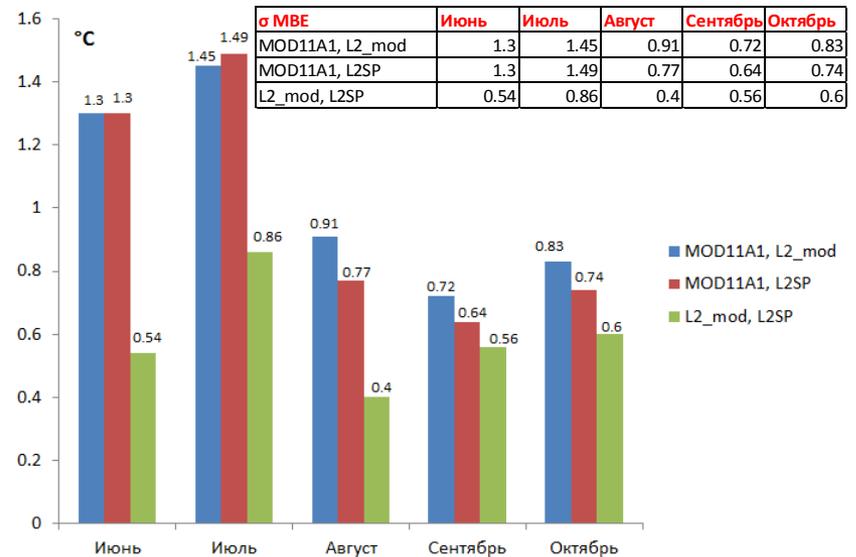


Также на июнь приходится и максимальное значение стандартного отклонения для всех трех способов оценки LST оз. Байкал (больше 1.5 °C), которое постепенно уменьшается и к сентябрю составляет приблизительно 1 °C.

Величина сдвига (MBE) между среднемесячными данными LST для различных данных и алгоритмов

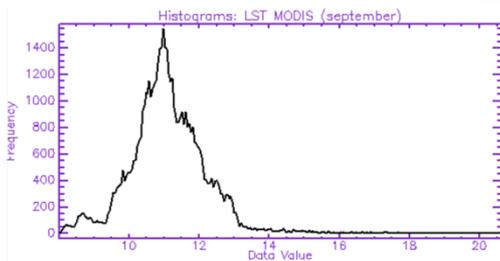
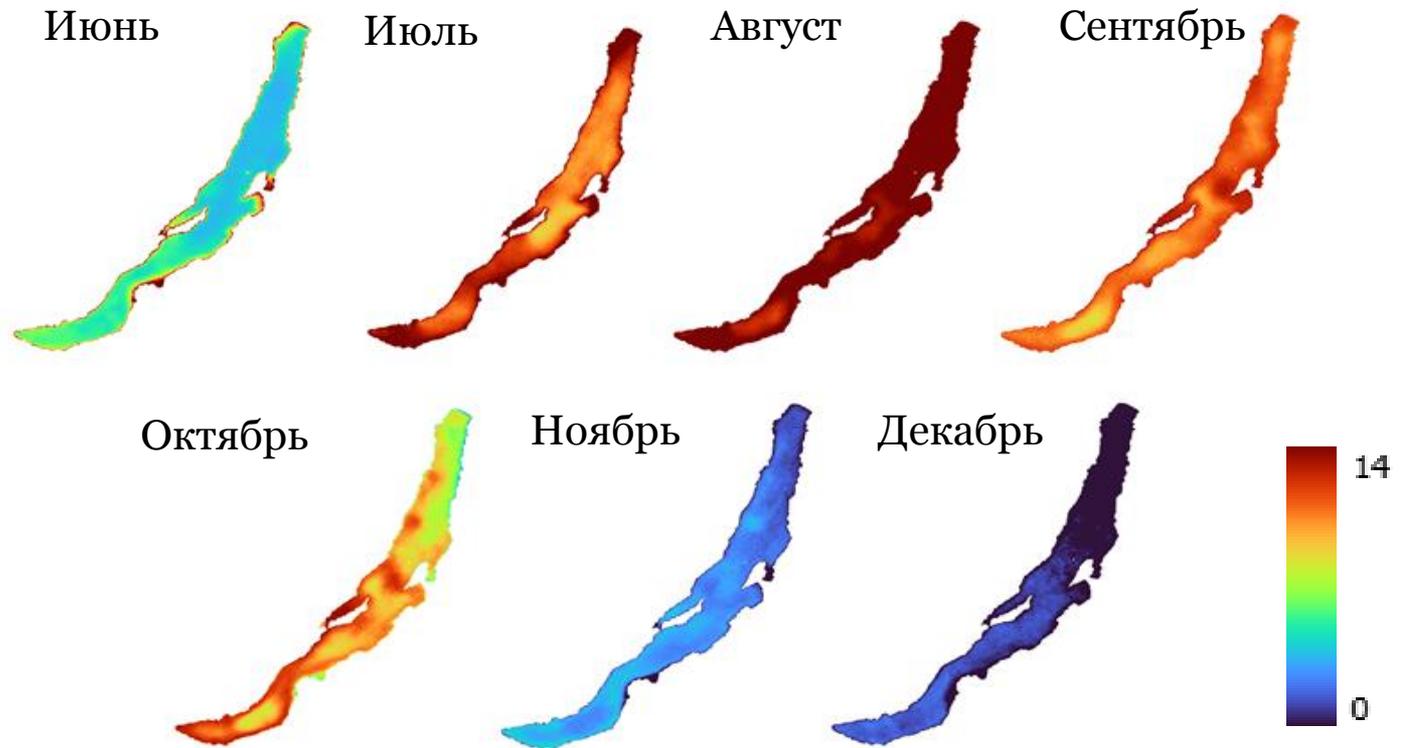


Стандартное отклонение (σ MBE)



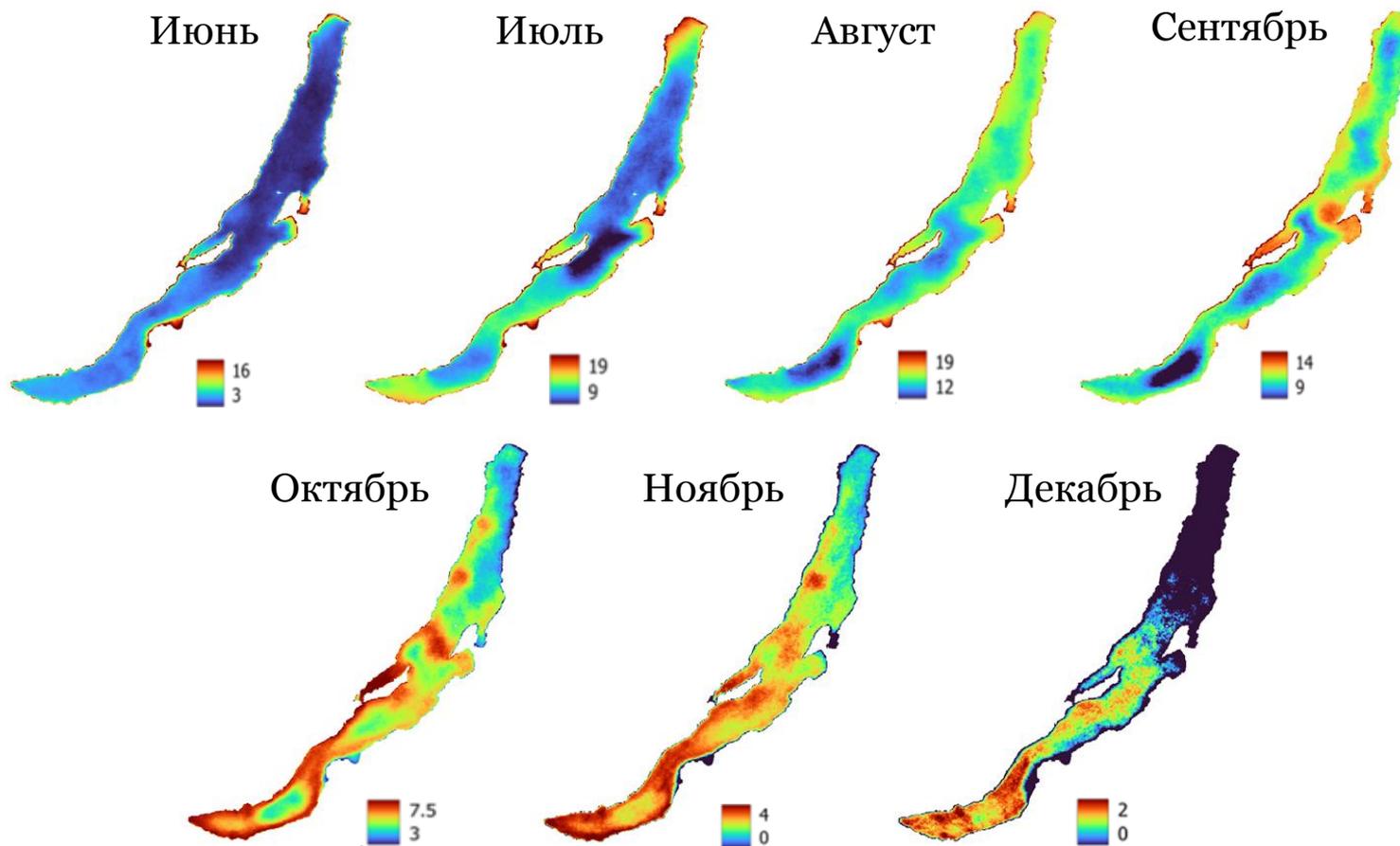
Величина сдвига между слоями не превышает по модулю 1,5 °C и зависит от сезона. Причем, величина сдвига между данными Landsat (MBE(L2_mod, L2SP)) монотонно убывает от июня к октябрю (от 1.41 °C до -1.06 °C), в августе сдвиг практически отсутствует. Значение MBE(MOD11A1, L2_mod) наоборот монотонно возрастает (от -0.83 °C до 1.2 °C) и практически равно нулю в сентябре. Сдвиг данных MOD11A1 и L2SP с июня по август уменьшается, в августе и сентябре становится отрицательным и примерно одинаковым (-0.63 °C и -0.6 °C), в октябре величина сдвига опять становится положительной (1.2°C). Это может быть связано с особенностями вычисления эмиссии водной поверхности, методикой проведения атмосферной коррекции и разным пространственным разрешением данных.

Динамика среднемесячных значений MODIS LST (июнь-декабрь)



Пример гистограммы
распределения MODIS LST
(сентябрь)

Динамика распределения MODIS LST акватории оз. Байкал (июнь-декабрь)



Выводы

- На основе серии многолетних спутниковых данных разного пространственного разрешения (MODIS LST и Landsat LST) и различных алгоритмов вычисления LST (L2SP и L2mod) построены картограммы среднемесячных температур, которые могут быть использованы для мониторинга распределения температуры акватории оз. Байкал.
- Экспериментальное сравнение рассмотренных алгоритмов вычисления LST показало, что их среднемесячные значения LST в бесснежный период достаточно близки, несмотря на различное пространственное разрешение, максимальное отличие приходится на июнь и октябрь, а наименьшее на сентябрь, что может быть обусловлено выравниванием значений температуры водной поверхности и температуры приземного слоя.
- Величина сдвига между различными данными находится в пределах от 0.06 °C до 1.41 °C по модулю, сдвиг может быть как в положительную, так и в отрицательную сторону зависит от сезона, что следует учитывать при проведении валидации спутниковых данных на основе наземных измерений.
- Анализ динамики распределения температуры по акватории оз. Байкала подтверждает неравномерный характер распределения температуры, максимальный прогрев поверхности озера в августе, а также указывает на сходный характер распределения поверхностных температур в октябре и ноябре.

Спасибо за внимание!