



УДК 556.555.4+528.8

DOI <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.26.114>

Применение интерполяции спутниковых данных для восстановления значений температуры поверхности воды оз. Байкал

Е. Н. Сутырина, С. С. Тимофеева

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Представлены результаты исследования возможности восстановления значений температуры поверхности воды оз. Байкал по данным радиометра AVHRR с применением интерполяции по времени. Актуальность исследования обусловлена тем, что при изучении распределения температуры поверхности воды по данным тепловых инфракрасных каналов приборов дистанционного зондирования серьезную помеху составляет облачность. В исследовании методом линейной интерполяции восстановлены данные о распределении температуры поверхности озера, проведено сравнение полученных в результате интерполяции картосхем с опорными картосхемами, составленными с использованием адаптированных для региональных условий алгоритмов непосредственно по спутниковым снимкам. Показано, что при незначительном (не превышающем 1,3 ч) расхождении по времени суток результата интерполяции и использовавшихся для интерполяции спутниковых данных можно получать удовлетворительную оценку значений температуры поверхности воды оз. Байкал со средней абсолютной ошибкой не более 1 °С. Влияние сдвига по времени суток на точность интерполяции связано с суточной изменчивостью температуры поверхности озера. По данным AVHRR был впервые установлен размах среднего по акватории оз. Байкал значения температуры поверхности, который может достигать за сутки практически 3 °С в июне и 4 °С – в июле.

Ключевые слова: оз. Байкал, температура поверхности воды, данные радиометра AVHRR, линейная интерполяция.

Для цитирования: Сутырина Е. Н., Тимофеева С. С. Применение интерполяции спутниковых данных для восстановления значений температуры поверхности воды оз. Байкал // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2018. Т. 26. С. 114–124. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.26.114>

Введение

Объектом исследования является оз. Байкал – крупнейшее по объему пресноводное озеро и самое глубокое озеро в мире. Байкал в качестве наиболее выдающегося примера сложной пресноводной экосистемы с 1996 г. является объектом Всемирного наследия ЮНЕСКО [Lake Baikal ... , 2017]. В условиях современных изменений климата, а также растущего антропогенного воздействия на водные объекты, включая увеличение рекреационной нагрузки, актуальность приобретают вопросы контроля состояния внутренних водоёмов, в том числе и с использованием средств дистанционного спутникового зондирования. При исследовании

оз. Байкал, имеющего длину в 672 км, ширину до 79 км и площадь акватории в 31,7 тыс. км² [Computer-Based Bathymetric ... , 2006; Cyclonic circulation and ... , 2015], применение дистанционных методов позволяет изучать озеро как целостный географический объект, следя за состоянием всего водоема и получая пространственно-временную информацию о происходящих в нем лимнических процессах, которую затруднительно обеспечить традиционными наземными методами, даже с использованием научно-исследовательских судов [Комплексный дистанционный мониторинг ... , 1987].

Одним из важнейших экологически значимых гидрофизических параметров водоемов, который может быть определён с применением спутниковых данных, является температура поверхности воды.

Температура поверхности озера представляет собой важный параметр состояния экосистемы [Thomas, Emery, 1988], который может служить индикатором климатических изменений [Ding, Elmore, 2015], применяться для изучения динамических явлений в водоеме [Malm, Jonsson, 1993; Cyclonic circulation and ... , 2015], использоваться для расчета элементов теплового баланса [Gautam, Omjai, 2000] и т. д.

При оценке распределения температуры поверхности воды озера по данным тепловых инфракрасных каналов приборов спутникового дистанционного зондирования серьезную помеху составляет облачность, так как при наличии облачности в инфракрасном диапазоне сенсор производит измерение параметров на верхней границе облачности и не регистрирует параметры поверхности воды. Поэтому актуальным является вопрос о возможности применения интерполяции для устранения пробелов в данных при наличии облачности над акваторией исследуемого водного объекта. В рамках исследования изучается возможность использования интерполяции по времени для восстановления информации о распределении температуры на поверхности для условий оз. Байкал.

Материалы и методы исследования

В рамках данного исследования были использованы данные радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), который установлен на борту метеорологических спутников серии NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration – Национальное управление океанических и атмосферных исследований США), функционирующих на околополярной орбите на высоте порядка 850 км. Радиометр AVHRR представляет собой типичный линейный сканер и измеряет собственное и отраженное Землей излучение в видимом, ближнем, среднем и тепловом инфракрасных диапазонах в шести спектральных каналах.

Почти сорокалетний опыт эксплуатации приборов AVHRR показал, что эти системы являются одними из самых удачных для изучения как морей и океанов, так и внутренних водоемов, и имеют одни из самых продолжительных рядов спутниковых наблюдений. Другим достоинством этого прибора является общедоступность информации и возможность её

регулярного получения. Для радиометра AVHRR линейный размер элемента разрешения на местности составляет около 1090 м в надире. Ширина полосы обзора превышает 2600 км, что позволяет наблюдать всю акваторию оз. Байкал за один пролет.

В рамках данного исследования отображена серия малооблачных снимков за безледоставный период 2015 г., в который повторяемость снимков с отсутствием облачности над акваторией оз. Байкал в открытый период была выше, чем в 2016 и 2017 гг. По всем отображенным снимкам были составлены картосхемы распределения температуры поверхности воды оз. Байкал.

Для оценки и картографирования температуры поверхности озера по данным AVHRR применялись адаптированные для региональных условий алгоритмы, основанные на дифференцированном определении температуры в различное время суток (день, ночь) и в различные месяцы (июнь-июль, август-сентябрь, октябрь-декабрь), использовании квадратичной модификации метода «расщепленного окна прозрачности» [Barton, 1995] и дополнительном привлечении информации видимого и ближнего инфракрасных каналов в дневное время суток. Использование разработанных региональных алгоритмов позволяет увеличить точность определения температуры поверхности воды до 0,4 °С в ночное время и до 0,3 °С – в дневное время суток [Сутырина, 2014]. Это дает преимущество перед применением предложенных ранее алгоритмов оценки температуры поверхности воды оз. Байкал [Могилев, Гнатовский, 2002], точность которых не превышала 0,7 °С для ночных условий и 0,5 °С – для дневных.

Для восстановления пробелов в сериях картосхем может применяться интерполяция спутниковых данных по времени [TiSeG: A Flexible ... , 2008; Feature-preserving interpolation ... , 2015; Ding, Liu, Huang, 2017].

Путем линейной интерполяции по времени был выполнен расчёт интерполированных значений температуры поверхности воды $T_i^{(sim)}$, °С, в i -м пикселе в момент времени $\tau \in (\tau_1; \tau_2)$:

$$T_i^{(sim)} = T_i^{(1)} \frac{\tau_2 - \tau}{\tau_2 - \tau_1} + T_i^{(2)} \frac{\tau - \tau_1}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (1)$$

где $T_i^{(1)}$ и $T_i^{(2)}$ – температура поверхности воды на обработанном с применением региональных алгоритмов спутниковом снимке в i -м пикселе в начальный τ_1 и конечный τ_2 моменты времени соответственно, °С.

Ниже на рис. 1, А приведен пример результатов оценки температуры на поверхности воды оз. Байкал, полученной в ходе линейной интерполяции спутниковых данных о температуре (см. рис. 1, Б, В).

Время здесь и далее приведено ко всемирному координированному времени UTC (Coordinated Universal Time) – международному стандарту времени, на котором основываются почти все навигационные системы мира, обеспечивающие движение самолетов, космических кораблей и спутников и т. д. [Wyatt, Tooley, 2007].

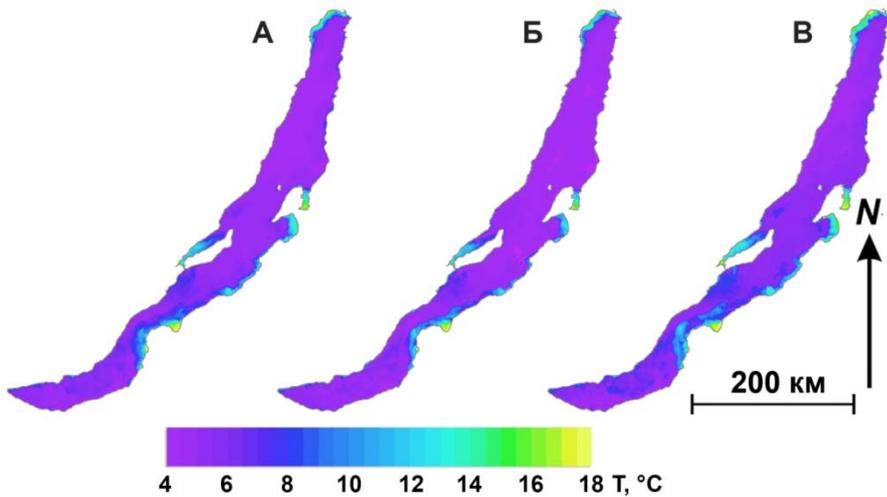


Рис. 1. Распределение температуры поверхности воды оз. Байкал в 22:23 17 июня 2015 г. (А), полученное в ходе интерполяции спутниковых данных о температуре в 22:35 16 июня 2015 г. (Б) и в 22:12 18 июня 2015 г. (В) (время в UTC)

Всего путем интерполяции было составлено 40 картографических изображений. Для интерполяции использовались пары спутниковых картосхем температуры, которые имели разницу по времени съёмки от 4 ч до 17 сут.

Результаты и их обсуждение

В ходе исследования было проведено сравнение данных о температуре, полученных в результате интерполяции, с опорными, совпадающим по времени съёмки данными, оцененными с использованием региональных алгоритмов непосредственно по спутниковым снимкам.

На рисунках 2 и 3 для примера приведено распределение опорных значений температуры поверхности воды оз. Байкал, рассчитанных по региональным алгоритмам (см. рис. 2, А; 3, А), и интерполированных значений температуры (см. рис. 2, Б; 3, Б), совпадающих по времени съёмки.

Также приведены картосхемы распределения абсолютных значений разности температуры воды, полученной по спутниковому снимку AVHRR и определенной в ходе интерполяции (см. рис. 2, В; 3, В).

Далее были рассчитаны значения средней абсолютной ошибки интерполяции *MAE* (the mean absolute error) по формуле

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |T_i^{(sim)} - T_i|, \quad (2)$$

где T_i – опорное значение температуры поверхности воды в i -м пикселе, рассчитанное по данным AVHRR по региональным алгоритмам, °С; $T_i^{(sim)}$ – значение температуры поверхности воды, полученное с помощью интерполяции, °С; n – число пикселей, находящихся в пределах акватории оз. Байкал.

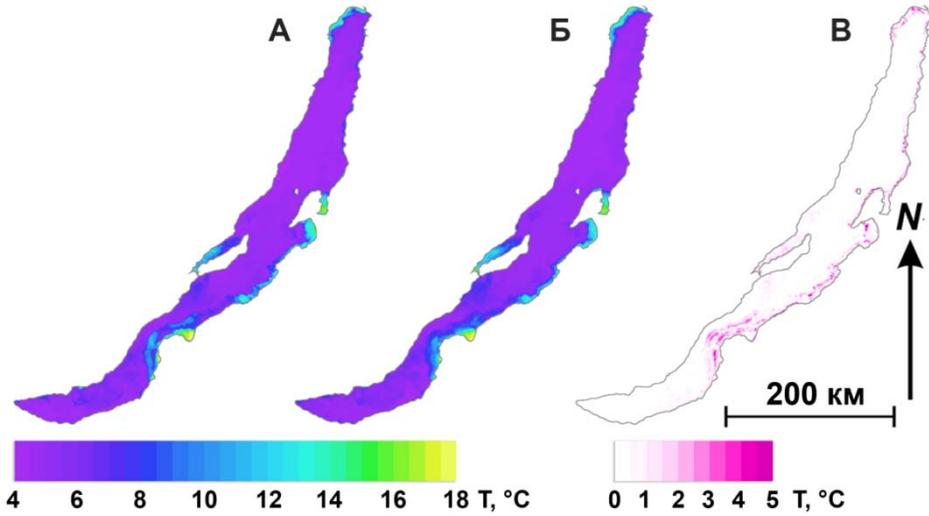


Рис. 2. Распределение температуры поверхности воды оз. Байкал в 22:23 17 июня 2015 г.:

A – рассчитанное по региональным алгоритмам по данным AVHRR; *Б* – полученное в ходе интерполяции спутниковых данных о температуре в 22:35 16 июня 2015 г. и в 22:12 18 июня 2015 г., *В* – абсолютное значение разности интерполированной температуры и температуры, полученной по региональному алгоритму по спутниковому снимку AVHRR (время в UTC)

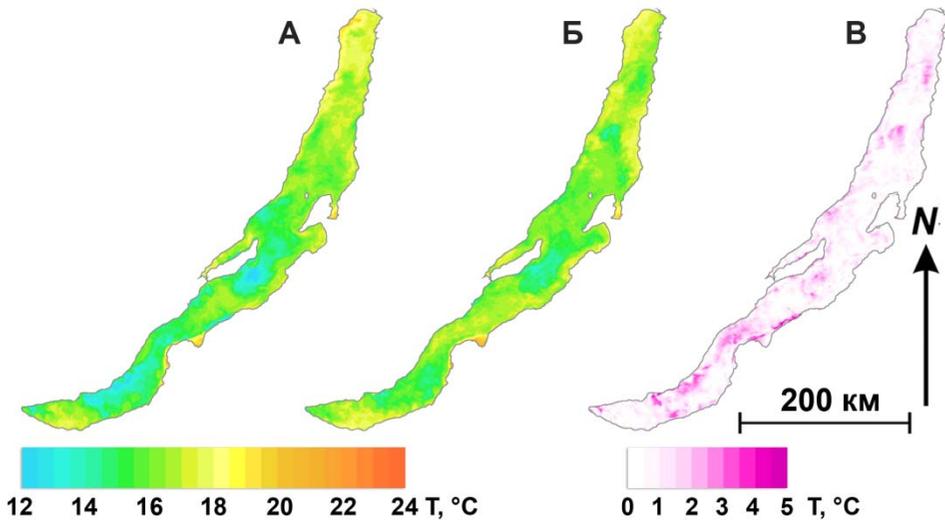


Рис. 3. Распределение температуры поверхности воды оз. Байкал в 22:55 28 июля 2015 г.:

A – рассчитанное по региональным алгоритмам по данным AVHRR; *Б* – полученное в ходе интерполяции спутниковых данных о температуре в 22:46 20 июля 2015 г. и в 22:52 6 августа 2015 г., *В* – абсолютное значение разности интерполированной температуры и температуры, полученной по региональному алгоритму по спутниковому снимку AVHRR (время в UTC)

MAE является одним из нескольких способов сравнения полученного интерполяцией значения с фактическим или опорным значением, обладает простотой расчёта и преимуществами в интерпретируемости по сравнению со среднеквадратической ошибкой. Это обусловлено тем, что каждая разность между опорным и интерполируемым значениями влияет на величину *MAE* в прямой пропорции и у *MAE* нет большей чувствительности к большим отклонениям интерполируемого значения от реального, что присутствует у среднеквадратической ошибки [Willmott, Matsuura, 2005].

Далее значения *MAE* сопоставлены с величиной сдвига по времени суток результатов интерполяции и исходных спутниковых данных о температуре, использовавшихся для интерполяции (рис. 4).

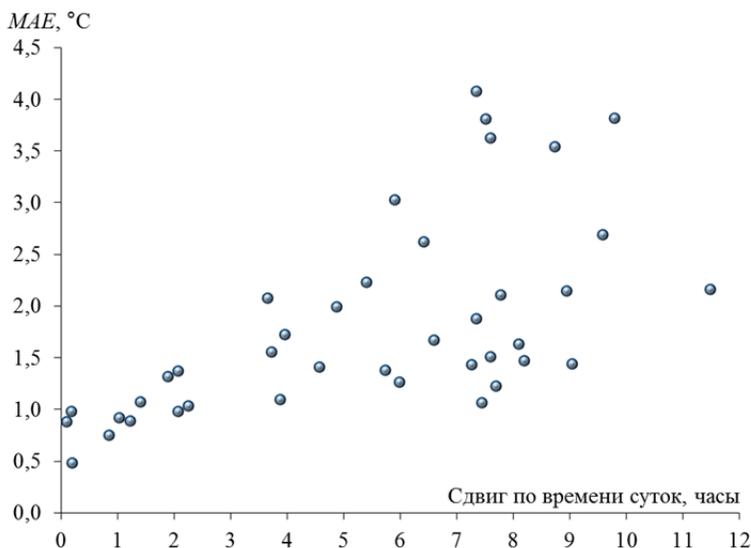


Рис. 4. Ошибки интерполяции температуры в сопоставлении со сдвигом по времени суток исходных снимков и результатов интерполяции

Можно сделать вывод: чем больше данный сдвиг по времени суток, тем больше значение ошибки интерполяции *MAE* (см. рис. 4). Вероятно, это связано с суточной изменчивостью температуры поверхности оз. Байкал.

На рисунке 5 представлена суточная изменчивость значений средней температуры поверхности оз. Байкал 16–18 июня и 20–21 июля 2015 г., оцененная по спутниковым снимкам AVHRR и демонстрирующая, что размах средних по акватории значений температуры за сутки в июне достигает практически 3 °C, а в июле увеличивается до 4 °C, что хорошо согласуется с данными, приведенным в работе [Хромов, Петросянц, 2012], где показано, что суточная амплитуда температуры на поверхности крупных внутренних водоемов в умеренных широтах составляет около 2–5 °C и с увеличением прогрева воды возрастает.

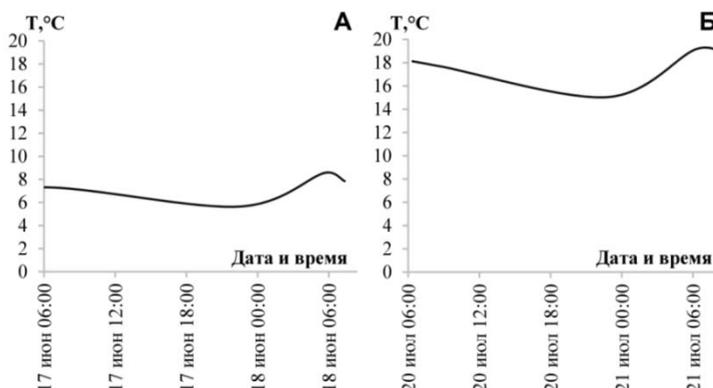


Рис. 5. Изменчивость средних значений температуры поверхности оз. Байкал в 2015 г. по данным AVHRR (время в UTC): А – 17–18 июня; Б – 20–21 июля

В целом суточная амплитуда температуры воды на поверхности водоемов достаточно невелика и намного меньше суточной амплитуды температуры воздуха [Хромов, Петросянц, 2012]. При этом существование даже относительно небольших суточных колебаний температуры вносит свои коррективы в применение линейной интерполяции для оценки температуры воды на поверхности озера.

Оцененные по спутниковым данным суточные колебания температуры воды на поверхности озера имеют максимум после полудня около 15–16 ч местного времени (по UTC около 6–7 ч) и минимум через 2–3 ч после восхода солнца (по UTC примерно 23 ч) (см. рис. 5), что также хорошо согласуется с данными в [Хромов, Петросянц, 2012].

Наличие суточного хода температуры обуславливает продемонстрированную выше (см. рис. 4) невозможность восстанавливать путем линейной интерполяции по времени значения температуры поверхности воды оз. Байкал с удовлетворительной точностью при использовании для оценки температуры в дневное время спутниковых данных, полученных ночью, и наоборот.

Однако при незначительном (не более 1,3 ч) расхождении по времени суток результата интерполяции и использовавшихся для интерполяции снимков (см. рис. 2 и 3) можно получать удовлетворительные результаты восстановления распределения температуры поверхности воды оз. Байкал с ошибкой не более 1 °C (см. рис. 4), которая сопоставима с ошибкой оценки температуры поверхности воды по данным AVHRR с применением ряда алгоритмов [Accuracy Assessment of ... , 2011; Comparison and validation ... , 2013; Comparison between remotely ... , 2014] и др.

В случае незначительного сдвига по времени суток ошибки интерполяции обусловлены, как правило, нелинейностью протекания различных динамических процессов в озере. В июне – начале июля ошибки прежде всего связаны с нелинейным эволюционированием термического бара (см. рис. 2, В), когда наибольшие отклонения интерполированных значений от опорных наблюдаются вблизи границы раздела между теплоактивными и теплоинертными областями.

В остальную часть безледоставного периода ошибки вызваны, в первую очередь, нелинейностью развития апвеллинга и многочисленных вихревых образований в озере (см. рис. 3, В). Это ведет к некоторому искажению паттерна (пространственной структуры) распределения температуры на поверхности и некоторой деформации в отображении динамических структур в поле температур в ходе интерполяции. Данное обстоятельство необходимо учитывать при использовании серии интерполированных снимков в изучении развития указанных явлений.

При этом обнаружено незначительное влияние увеличения временного интервала между используемыми при интерполяции спутниковыми картами на величину ошибки MAE вплоть до увеличения данного промежутка до 17 сут (см. рис. 3, В).

Выводы

В настоящем исследовании внимание было уделено изучению возможности применения линейной интерполяции по времени для восстановления пробелов в серии температурных картосхем оз. Байкал, вызванных облачностью, которая с учетом фрагментарного покрытия акватории данного водоема имеет достаточно высокую повторяемость в безледоставный период и является помехой для определения температуры поверхности озера.

Методом линейной интерполяции были восстановлены данные о температуре поверхности оз. Байкал и проведено сравнение полученных в результате интерполяции значений температуры с опорными значениями, совпадающими по времени съемки.

Составлены картосхемы пространственного распределения абсолютного значения разностей интерполированной температуры и температуры, полученной по опорному спутниковому снимку AVHRR. Определена величина средней абсолютной ошибки интерполяции температуры поверхности оз. Байкал.

Обнаружено, что чем больше сдвиг по времени суток результата интерполяции и использовавшихся для интерполяции снимков, тем, соответственно, больше ошибка интерполяции. Видимо, это связано с суточной изменчивостью температуры поверхности оз. Байкал. По данным AVHRR в работе был впервые установлен размах среднего по акватории озера значения температуры поверхности, который может достигать за сутки практически $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ в июне и $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ – в июле.

Таким образом, приемлемым вариантом линейной интерполяции для восстановления значений температуры поверхности воды может быть только интерполяция с минимальным смещением по времени суток как самих спутниковых данных, применяемых для интерполяции, так и результата интерполяции. Показано, что при расхождении по времени суток (не более 1,3 ч) результата интерполяции и использовавшихся спутниковых данных можно с удовлетворительной точностью восстанавливать значения температуры поверхности воды оз. Байкал со средней абсолютной ошибкой не более $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты № 17-29-05045 и № 17-29-05047.

Список литературы

Комплексный дистанционный мониторинг озер / отв. ред. К. Я. Кондратьев. Л. : Наука, 1987. 288 с.

Могилев Н. Ю., Гнатовский П. Ю. Исследование режима температуры поверхности озера Байкал с использованием регулярной спутниковой информации // География и природ. ресурсы. 2002. № 2. С. 136–142.

Сутырина Е. Н. Изучение внутренних водоемов и водосборов с применением данных дистанционного зондирования Земли. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2014. 133 с.

Хромов С. П., Петросяну М. А. Метеорология и климатология. М. : Изд-во МГУ, 2012. 584 с.

Accuracy Assessment of Sea Surface Temperature from NOAA/AVHRR Data in the Seas around Korea and Error Characteristics / Kyung-Ae Park, Eun-Young Lee, Sung-Rae Chung, Eun-Ha Sohn // Korean Journal of Remote Sensing. 2011. Vol. 27, N 6. P. 663–675.

Barton I. J. Satellite-derived sea surface temperatures: Current status // J. Geoph. Res. 1995. Vol. 100. P. 8777–8790.

Comparison and validation of «sea surface temperature (SST)» using MODIS and AVHRR sensor data / Madhavan Narayanan, D. Thirumalai Vasan, A. K. Bharadwaj, P. Thanabalan, N. Dhileeban // International Journal of Remote Sensing & Geoscience. 2013. Vol. 2, Is. 3. P. 1–7.

Comparison between remotely-sensed sea-surface temperature (AVHRR) and in situ records in San Matías Gulf (Patagonia, Argentina) / Gabriela N. Williams, Paula C. Zaidman, Nora G. Glembocki, Maite A. Narvarte, Raúl A.C. González, José L. Esteves, Domingo A. Gagliardini // Lat. Am. J. Aquat. Res. 2014. Vol. 42, N 1. P. 192–203. <https://doi.org/103856/vol42-issue1-fulltext-16>.

Computer-Based Bathymetric Map of Lake Baikal / P. P. Sherstyankin, S. P. Alekseev, A. M. Abramov, K. G. Stavrov, M. De Batist, R. Hus, M. Canals, J. L. Casamor // Doklady Earth Sciences. 2006. Vol. 408, N 4. P. 564–569.

Cyclonic circulation and upwelling in Lake Baikal / E. Troitskaya, V. Blinov, V. Ivanov, A. Zhdanov, R. Gnatovsky, E. Sutyryna, M. Shimaraev // Aquatic Sciences. 2015. Vol. 77, Is. 2. P. 171–182. <https://doi.org/10.1007/s00027-014-0361-8>.

Ding Haiyong, Elmore Andrew J. Spatio-temporal patterns in water surface temperature from Landsat time series data in the Chesapeake Bay, U.S.A // Remote Sensing of Environment. 2015. Vol. 168. P. 335–348. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.07.009>.

Ding Chao, Liu Xiangnan, Huang Fang. Temporal Interpolation of Satellite-Derived Leaf Area Index Time Series by Introducing Spatial-Temporal Constraints for Heterogeneous Grasslands // Remote Sens. 2017. Vol. 9(9), N 968. P. 1–12. <https://doi.org/10.3390/rs9090968>.

Feature-preserving interpolation and filtering of environmental time series / G. Mariethoz, N. Linde, D. Jougnot, H. Rezaee // Environmental Modelling and Software. 2015. Vol. 72. P. 71–76. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.07.001>.

Gautam R. K., Omjai S. V. Sea Surface Temperature and Net Heat Flux Variation in The Gulf of Thailand Using Buoy, Meteorological and Remote Sensing Data // Coastal Engineering Journal. 2000. Vol. 42, N 4. P. 341–356.

Lake Baikal [Electronic resource] // UNESCO. URL: <https://whc.unesco.org/en/list/754> (date of access: 02.08.2017).

Malm J., Jonsson L. A study of the thermal bar in Lake Ladoga using water surface temperature data from satellite images // Remote sensing of Environment. 1993. Vol. 44. P. 35–46.

Thomas A. C., Emery W. J. Relationship between near-surface plankton concentration, hydrography, and satellite-measured sea surface temperature // J. Geophy. Res. 1988. N 93 (C12). P. 15733–15748.

TiSeG: A Flexible Software Tool for Time-Series Generation of MODIS Data Utilizing the Quality Assessment Science Data Set / René R. Colditz, Christopher Conrad, Thilo Wehrmann, Michael Schmidt, and Stefan Dech // IEEE transactions on geoscience and remote sensing. 2008. Vol. 46, N 10. P. 3296–3308.

Willmott C. J., Matsuura K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance // *Climate Research*. 2005. Vol. 30. P. 79–82. <https://doi.org/10.3354/cr030079>.

Wyatt D., Tooley M. *Aircraft Communications and Navigation Systems: Principles, Maintenance and Operation*. Elsevier, 2007. 329 p.

The Application of the Interpolation of Satellite Data to Recover Lake Baikal Water Surface Temperature Values

E. N. Sutyryna, S. S. Timofeeva

Irkutsk State University, Irkutsk

Abstract. In the paper, an attention was paid to the study of the possibility of using linear temporal interpolation of time series data of the surface temperature of Lake Baikal retrieved from AVHRR data to recover the gaps caused by cloudiness. This approach was verified using a set of coincident water surface temperature estimates acquired by AVHRR-based regional retrieval algorithms and evaluations through time series interpolation. During the research, maps of the spatial distribution of absolute values of the differences between coincident interpolated temperature estimates and temperature retrievals obtained with regional algorithms were compiled. Also values of the mean absolute error of interpolation of the surface temperature of Lake Baikal were assessed. It was shown, that if the shift between the times of day of the interpolation result and of data used for interpolation was greater, then the error of interpolation was larger too. So, if the shift was not more than 1.3 hour, then the mean absolute error was less than 1 °C. Apparently, this was due to the diurnal variability of the surface temperature of Lake Baikal. According to AVHRR data, the diurnal range of the mean lake water surface temperature reached almost 3 °C in June and 4 °C in July.

Keywords: Lake Baikal, water surface temperature, AVHRR data, linear interpolation.

For citation: Sutyryna E. N., Timofeeva S.S. The Application of the Interpolation of Satellite Data to Recover Lake Baikal Water Surface Temperature Values. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2018, vol. 26, pp. 114-124. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.26.114> (in Russian)

References

Kondrat'ev K. Ya. (ed.). *Kompleksnyi distantsionnyi monitoring ozer* [Integrated remote monitoring of lakes]. Leningrad, Nauka, 1987, 288 p. (in Russian)

Mogilev N. Yu., Gnatovskii R. Yu. Issledovanie rezhima temperaturny poverkhnosti ozera Baikal s ispol'zovaniem regul'arnoi sputnikovoi informatsii [Investigation of the temperature regime of the surface of Lake Baikal using regular satellite information]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and natural resources], 2002, no. 2, pp. 136-142. (in Russian)

Sutyryna E. N. *Izuchenie vnutrennikh vodoemov i vodosborov s primeneniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli* [A study of inland water bodies and catchments using remote sensing data of the Earth]. Irkutsk, IGU Publ., 2014, 133 p. (in Russian)

Khromov S. P., Petrosyants M. A. *Meteorologiya i klimatologiya* [Meteorology and Climatology]. Moscow, MSU Publ., 2012. 584 p. (in Russian)

Park Kyung-Ae, Lee Eun-Young, Chung Sung-Rae, Sohn Eun-Ha. Accuracy Assessment of Sea Surface Temperature from NOAA/AVHRR Data in the Seas around Korea and Error Characteristics. *Korean Journal of Remote Sensing*, 2011, vol. 27, no. 6, pp. 663-675.

Barton I. J. Satellite-derived sea surface temperatures: Current status. *J. Geoph. Res.*, 1995, vol. 100, pp. 8777-8790.

Narayanan Madhavan, Vasana D. Thirumalai, Bharadwaj A. K., Thanabalan P., Dhileeban N. Comparison and validation of "sea surface temperature (SST)" using MODIS and AVHRR sensor data. *International Journal of Remote Sensing & Geoscience*, 2013, vol. 2, is. 3, pp. 1-7.

Williams Gabriela N., Zaidman Paula C., Glembocki Nora G., Narvarte Maite A., González Raúl A. C., Esteves José L., Gagliardini Domingo A. Comparison between remotely-

sensed sea-surface temperature (AVHRR) and in situ records in San Matías Gulf (Patagonia, Argentina). *Lat. Am. J. Aquat. Res.* 2014, vol. 42, no. 1. pp. 192-203. <https://doi.org/103856/vol42-issue1-fulltext-16>

Sherstyankin P. P., Alekseev S. P., Abramov A. M., Stavrov K. G., De Batist M., Hus R., Canals M., Casamor J. L. Computer-Based Bathymetric Map of Lake Baikal. *Doklady Earth Sciences*, 2006, vol. 408, no. 4. pp. 564-569.

Troitskaya E., Blinov V., Ivanov V., Zhdanov A., Gnatovsky R., Sutyryna E., Shimaraev M. Cyclonic circulation and upwelling in Lake Baikal. *Aquatic Sciences*, 2015, vol. 77, is. 2, pp. 171-182. <https://doi.org/10.1007/s00027-014-0361-8>

Ding Haiyong, Elmore Andrew J. Spatio-temporal patterns in water surface temperature from Landsat time series data in the Chesapeake Bay, U.S.A. *Remote Sensing of Environment*, 2015, vol. 168, pp. 335-348. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.07.009>

Ding Chao, Liu Xiangnan, Huang Fang. Temporal Interpolation of Satellite-Derived Leaf Area Index Time Series by Introducing Spatial-Temporal Constraints for Heterogeneous Grasslands. *Remote Sens.*, 2017, vol. 9(9), no. 968, pp. 1-12. <https://doi.org/10.3390/rs9090968>

Mariethoz G., Linde N., Jougnot D., Rezaee H. Feature-preserving interpolation and filtering of environmental time series. *Environmental Modelling and Software*, 2015, vol. 72, pp. 71-76. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.07.001>

Gautam R.K., Omjai S.V. Sea Surface Temperature and Net Heat Flux Variation in The Gulf of Thailand Using Buoy, Meteorological and Remote Sensing Data. *Coastal Engineering Journal*, 2000, vol. 42, no. 4, pp. 341-356.

Lake Baikal. Available at: <https://whc.unesco.org/en/list/754> (date of access: 02.08.2017).

Malm J., Jonsson L. A study of the thermal bar in Lake Ladoga using water surface temperature data from satellite images. *Remote sensing of Environment*, 1993, vol. 44, pp. 35-46.

Thomas A. C., Emery W. J. Relationship between near-surface plankton concentration, hydrography, and satellite-measured sea surface temperature. *J. Geophys. Res.*, 1988, no. 93 (C12), pp. 15733-15748.

Colditz René R., Conrad Christopher, Wehrmann Thilo, Schmidt Michael, Dech Stefan. TiSeG: A Flexible Software Tool for Time-Series Generation of MODIS Data Utilizing the Quality Assessment Data Set. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2008, vol. 46, no. 10, pp. 3296-3308.

Willmott C. J., Matsuura K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 2005, vol. 30, pp. 79-82. <https://doi.org/10.3354/cr030079>

Wyatt D., Tooley M. *Aircraft Communications and Navigation Systems: Principles, Maintenance and Operation*. Elsevier, 2007. 329 p.

Сутырина Екатерина Николаевна

кандидат географических наук, доцент
кафедра гидрологии и природопользования
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: (3952) 52-10-72
e-mail: ensut78@gmail.com

Sutyryna Ekaterina Nikolaevna

Candidate of Sciences (Geography),
Associate Professor, Department
of Hydrology and Nature Management
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
tel.: (3952) 52-10-72
e-mail: ensut78@gmail.com

Тимофеева София Сергеевна

студент, географический факультет
Иркутский государственный университет
тел.: (3952) 52-10-72
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: t.sofiya@bk.ru

Timofeeva Sofia Sergeevna

Student, Faculty of Geography
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
tel.: (3952) 52-10-72
e-mail: t.sofiya@bk.ru

Дата поступления: 10.10.2018

Received: October, 10, 2018