Исследование сезонного изменения температуры воды озёрной части Горьковского водохранилища в 2018 г. по данным *in situ* измерений и спутниковым изображениям высокого разрешения

А. А. Мольков [1,2], М. Г. Гречушникова [3], И. А. Капустин [1,2], Г. В. Лещёв [1], А. А. Алескерова [4], М. Ю. Грищенко [3]

[1] *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия*
E-mail: a.molkov@inbox.ru

[2] *Волжский государственный университет водного транспорта*
Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: kapustin-i@yandex.ru

[3] *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова*
Москва, 119991, Россия
E-mail: allavis@mail.ru

[4] *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия*
E-mail: annete08@mail.ru

Настоящая работа посвящена анализу пространственно-временной изменчивости температуры воды в приплотинном участке Горьковского вдхр. в период с мая по октябрь 2018 г. с использованием данных судовых измерений и оптических изображений со спутника Landsat-8. В работе приводятся результаты анализа изменчивости вертикального градиента температуры воды и его зависимости от метеорологических условий на разных участках акватории. Проанализирована сезонная пространственная изменчивость температуры поверхности воды и представлены примеры её восстановления по спутниковым снимкам. Получены оценки точности такого восстановления для разных участков водоёма и в зависимости от метеорологических условий. Сделан вывод о необходимости аккуратного использования данных *in situ* измерений, выполненных позднее спутниковой съёмки, учитывая пространственно-временную изменчивость поля температуры, зависящую от синоптических условий и фазы водного режима. Полученные результаты могут быть использованы при анализе архивных спутниковых изображений для получения информации о межгодовой и сезонной изменчивости характеристик водных масс водохранилищ на масштабах, превышающих возможности традиционных станционных измерений, и с высоким пространственным разрешением.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, спутниковый мониторинг, Landsat-8, температура воды, Горьковское водохранилище

Одобрена к печати: 28.01.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-216-229

Введение

Внутренние водоёмы играют важную роль в экономике и жизнедеятельности регионов и оказывают значимое влияние на региональный климат (Adrian et al., 2009; Williamson et al., 2009). В зоне особого интереса оказываются водохранилища и озёра вблизи крупных городов. На их акваториях ведётся многолетний мониторинг физических, биологических и химических процессов, базирующийся на судовых измерениях ряда ключевых гидрологических характеристик на строго определённых станциях и с заданной периодичностью. Одной из наиболее часто измеряемых и востребованных характеристик является температура воды и её пространственно-временная изменчивость (Sharma et al., 2015). Эта характеристика важна с гидроэкологической точки зрения, поскольку определяет как физические процессы внутри водоёма, его взаимодействие с поверхностью, так и химические и биологические процессы. Восстанавливать температуру поверхности воды можно и с использованием средств дистанционного зондирования судового, авиа- и космического базирования. Широкое распространение

получили методы, использующие спутниковые оптические изображения в красном и ближнем инфракрасном (ИК) каналах (Hosoda et al., 2007; MacCallum, Merchant, 2012). Эти методы успешно применяются при мониторинге океанов и морей. Синхронные подспутниковые наблюдения позволяют выявить и количественно оценить ошибки в дистанционном измерении характеристик, определить характерные линейные масштабы изменчивости и установить районы акватории с регулярно наблюдаемыми аномалиями, а также расширить знания о межгодовой и сезонной изменчивости характеристик вод на пространственно-временных масштабах, превышающих возможности традиционных станционных измерений (Шульга и др., 2019; Goldman et al., 1993).

С появлением космических сканеров цвета среднего и высокого разрешения стало возможным детально исследовать различные характеристики внутренних водоёмов практически любых размеров (Palmer et al., 2015). Но ввиду существенной пространственно-временной изменчивости характеристик их вод *in situ* измерения должны выполняться как в соответствии с общими требованиями подспутниковых измерений (Mueller et al., 2003), так и с учётом региональных особенностей водоёма (Hansen et al., 2017; Molkov et al., 2020; Soomets et al., 2019). Последние могут оказаться более жёсткими, чем для проточных водоёмов с регулярной ветро-волновой нагрузкой.

Цель настоящей работы — оценка пространственно-временной изменчивости температуры воды в приплотинном районе Горьковского вдхр. и определение качества её восстановления по данным спутникового зондирования.

Объект исследований

Горьковское вдхр. было заполнено в 1957 г. и имеет сложную конфигурацию: от г. Рыбинска до устья р. Елнати (337 км) выделяют русловую часть, ниже до плотины Нижегородской гидроэлектростанции (120 км) расположено озеровидное расширение. Водохранилище осуществляет сезонное регулирования стока, что обусловливает большую проточность с коэффициентом водообмена 5,41 год$^{-1}$ (Буторин, 1969).

Наши подспутниковые измерения проводились в приплотинной части водохранилища в период с мая по октябрь 2018 г. (*рис. 1*). Для этого района в мае характерно наличие весенней стратифицированной водной массы. Во второй половине лета водная масса в приплотинной части становится однородной. Приустьевые заливы притоков обычно заполняют речные воды, отличающиеся от основной водной массы повышенной минерализацией и пониженной температурой (Эдельштейн, 1968).

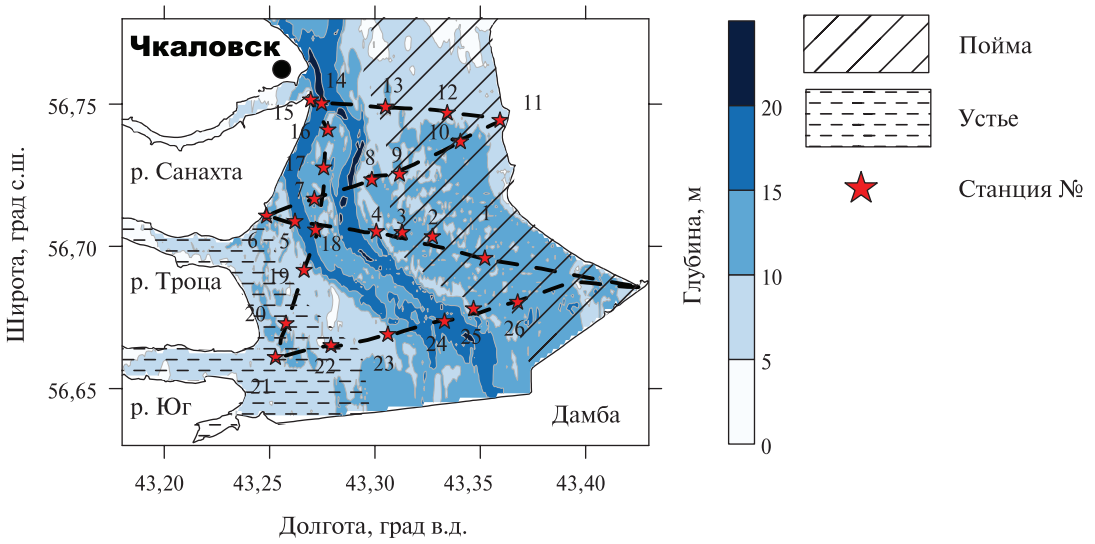

Рис. 1. Схема регулярных рейсов в приплотинном участке Горьковского вдхр.

Методы и подходы

In situ измерения

В работе использованы данные измерений, полученные в ходе регулярных рейсов маломерного судна «Геофизик» Института прикладной физики РАН, выполненных в период с середины мая по середину октября 2018 г. Всего проведены 24 суточные экспедиции. Рейсы проходили по единому (с поправкой на погодные условия) для всех дней маршруту, представленному на *рис. 1*. Температура поверхностного слоя воды измерялась непрерывно по ходу следования судна с помощью бортового картплоттера Garmin EchoMap 51s, датчик температуры которого был расположен на глубине 15 см. Данные о температуре совместно с GPS-координатами судна (*англ*. Global Positioning System, система глобального позиционирования) регистрировались с частотой 1 Гц, что при скорости движения судна 8–11 км/ч соответствовало пространственному разрешению порядка 2–3 м. Точность позиционирования составляла 5–10 м, точность определения температуры — 0,1 °С. Измерение вертикальных профилей температуры воды производилось в течение нескольких минут в дрейфе по сетке из 26 станций, расположенных квазиэквидистантно с шагом 1–2 км таким образом, чтобы охватить затопленную пойму, русло и устья притоков рек Санахта, Троца и Юг (см. *рис. 1*). Измерения проводились с помощью флуорометра BBE Moldaenke Fluoroprobe III, оснащённого датчиком температуры и давления. Точность измерений составляла 0,1 °С. Расхождения в показаниях различных приборов по температуре воды в поверхностном слое не превышали 0,2 °С.

Движение по маршруту начиналось в 08:00–09:00 утра и продолжалось до 16:00–18:00. В момент спутниковой съёмки (11:05) сканера высокого разрешения Landsat-8/OLI (15 и 22 мая, 16 июня, 3 и 10 августа) судно находилось в районе станций 4–8. Такой подход позволил не только получить данные, максимально близкие к моменту съёмки и необходимые для верификации результатов восстановления температуры воды по спутниковым данным, но также исследовать расходимость в результатах измерения и восстановления температуры воды через некоторое время после спутниковой съёмки на этих же станциях за счёт вторичного их прохождения судном (см. маршрут).

Спутниковые данные

Для дистанционного измерения температуры воды использованы космические снимки со спутника Landsat-8. Время пролёта спутника над исследуемым полигоном — 08:08 UTC (11:08 МСК) 22 мая и 10 августа и 08:03 UTC (11:03 МСК) 15 мая, 16 июня и 3 августа.

Данные о температуре воды по спутниковым данным Landsat-8 были получены с помощью двухканального алгоритма (Алескерова и др., 2016). Данный алгоритм позволяет восстановить реальную поверхностную температуру воды. На спутнике Landsat-8 установлен прибор TIRS (*англ*. Thermal Infrared Sensor), который измеряет в двух каналах в дальнем ИК-диапазоне (10,30–11,30 мкм; 11,50–12,50 мкм), что позволяет провести атмосферную коррекцию измерений. Сигнал, принимаемый спутником, есть сумма сигналов от водной поверхности (собственно температура) и от атмосферы (связан с пропусканием атмосферы). Излучательные характеристики атмосферы в двух каналах различны, а характеристики излучения поверхности одинаковы (в первом приближении). Таким образом, температуру поверхности воды по данным Landsat-8 можно рассчитать по следующей формуле:

$$T_{\text{в}} = 1{,}911\,T_{10} - 0{,}8554\,T_{11} + 0{,}7837,$$

где T_{10} и T_{11} — температура, полученная с каналов 10 и 11 соответственно. Для определения коэффициентов использовались калиброванные данные о температуре, полученные по измерениям прибора MODIS (*англ*. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer).

Случаи, когда даты пролёта и рейса судна не совпадали, не рассматривались, использовались только данные предыдущих или последующих суток при условии отсутствия резкой смены погодных условий.

Результаты и обсуждение

В период натурных измерений наблюдалась частая смена погодных условий, причём наиболее жаркие периоды антициклонической погоды были отмечены в июне (*рис. 2*). В циклоническую погоду отмечалось усиление ветра: 3 июля, 11 и 27 августа, 23 сентября и 4–6 октября его максимальная скорость превышала 10 м/с. Данная изменчивость погодных условий оказала несомненное влияние на формирование вертикальной гидрологической структуры приплотинного плёса водохранилища.

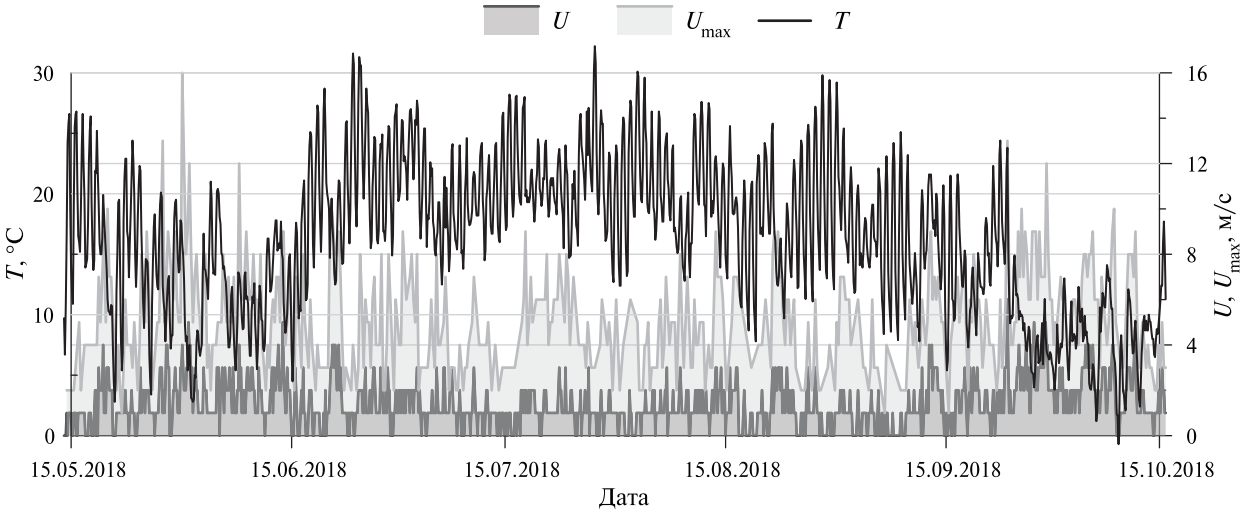

Рис. 2. Изменение метеорологических характеристик в период измерений по трёхчасовым данным Волжской гидрометеорологической обсерватории: температура воздуха (T, °C); средняя (U, м/с) и максимальная (U_{max}, м/с) скорость ветра

Несмотря на значительную проточность в озёрной части Горьковского вдхр., присутствует прямая стратификация, причём наиболее ярко она выражена в первую половину лета, как и было выявлено в предыдущих исследованиях (Буторин, 1969). Особенности погодных условий проявились в вертикальном распределении температуры воды, измеренной в рейсах. При этом детальный анализ позволил выявить пространственную неоднородность поля температуры воды и её изменения в летний период.

Прежде всего, необходимо охарактеризовать внутрисуточный ход температуры воды по полученным измерениям, поскольку рейсы проводились в течение нескольких часов (*табл. 1*). Для обозначения направления, откуда дует ветер, используются основные румбы: север (С); северо-восток (СВ); восток (В); юго-восток (ЮВ); юг (Ю); юго-запад (ЮЗ); запад (З); северо-запад (СЗ), а также промежуточные: северо-северо-восток (ССВ), востоко-северо-восток (ВСВ), востоко-юго-восток (ВЮВ), юго-юго-восток (ЮЮВ), юго-юго-запад (ЮЮЗ), западо-юго-запад (ЗЮЗ), западо-северо-запад (ЗСЗ), северо-северо-запад (ССЗ).

В течение летнего периода имеется тенденция к уменьшению пространственной неоднородности температуры поверхности воды (*рис. 3*, см. с. 222). Это может быть связано с уменьшением вертикального градиента температуры воды (*рис. 4а*, см. с. 222), когда однородная водная толща менее значимо реагирует на изменения синоптических условий. В комментариях к *табл. 1* детально рассмотрены особенности внутрисуточного хода и причины пространственных изменений, связанных преимущественно со сгонно-нагонными явлениями.

Таблица 1. Характерные значения измеренной температуры поверхности воды (T_0), интервала её изменений (ΔT_0), температуры воды, восстановленной по спутниковым изображениям ($T_в$), интервала её изменений ($\Delta T_в$), средней (U) и максимальной ($U_{макс.}$) скорости ветра и его направления φ на даты рейсов; $T_{возд}$ — температура воздуха

Дата	T_0, °C	ΔT_0, °C	$T_в$, °C	$\Delta T_в$, °C	U, м/с	$U_{макс.}$, м/с	φ	Комментарии
14 мая	12,8–19,2	6,4	6,7–26,6	19,9	0–1	2	ЗЮЗ	Выражен суточный ход; мин. на ст. 1, 14, макс. на ст. 8–13 из–за влияния ветра
15 мая	14,9–20,5	5,6	10,9–26,8	15,9	0–1	2–3	ЮЗ	Макс. T_0 на ст. 8, 11, 12 — нагон, мин. на ст. 15, 21 — сгон и влияние притока речных вод
16 мая	14,2–18,9	4,7	16–26,6	10,6	1	3–5	ЗЮЗ	Наиболее быстро увеличивается придонная температура воды у более проточных русловых станций
17 мая	15–22,7	7,7	13,9–26,4	12,5	0–1	3–4	ЗЮЗ	Выражен суточный ход; нагон на ст. 10–12 в 12:00, сгон на ст. 14 и 15 в 13:00; возможно влияние притока более холодных речных вод на ст. 5–6, 14–15; продолжение измерений со ст. 16 в 15:00 после затишья — увеличение T_0 у правого берега
22 мая	14,6–19,0	4,38	5,4–22,9	17,5	1–2	5–6	ЮВ	Макс. T_0 на ст. 15 приурочен к усилению скорости ветра ЮЮВ румбов, что обусловило нагон, но отсутствие увеличения T_0 на соседних станциях и повышенная T_0 на ст. 21 свидетельствуют, скорее, о влиянии речной водной массы, температура которой мало отреагировала на похолодание 21 мая
16 июня	14,6–17,2	2,6	9,7–21,1	11,4	1–3	5–8	ССЗ	Слабо выражен суточный ход с макс. на ст. 20, 21, 22 в 16:00–17:00, что дополнительно обусловлено нагоном с более мелководной зоны
19 июня	19,3–24	4,7	15,2–28,7	15,2	0–1	2	ЗЮЗ	Выражен суточный ход с мин. на ст. 6, 7 из-за сгона и макс. на ст. 25 в 13:30, что обусловлено снижением скорости и сменой направления ветра на В, пригнавшего более тёплую воду с мелководной зоны
22 июня	17,6–23,6	6	14,2–26	11,8	0–1	3	ЗЮЗ	Выражен суточный ход с мин. около 12:00 на ст. 4–7 из-за усиления западного ветра и с макс. на ст. 24–26 после 16:00 при усилении ЮЗ ветра, нагнавшего воду от дамбы
3 июля	20,7–24,3	3,6	16,3–25,4	9,1	0–1	3	СЗ	Выражен суточный ход с мин. около 14:00 на ст. 19–21 из-за сгона
10 июля	19,8–21,1	1,3	17,5–21,8	4,3	1–3	7	ССЗ	Внутрисуточный ход почти не выражен из-за малой амплитуды $T_{возд}$ и сильного ветра
12 июля	20,6–21,9	1,3	14,5–23,2	8,7	0–1	4–5	ССЗ	Внутрисуточный ход выражен слабо, несмотря на увеличение амплитуды $T_в$ из-за сильного ветра
23 июля	21,9–22,2	0,3	15,5–24	8,5	1–3	5–8	В	Внутрисуточный ход не выражен из-за сильного ветра

Окончание табл. 1

Дата	T_0, °C	ΔT_0, °C	$T_в$, °C	$\Delta T_в$, °C	U, м/с	$U_{макс.}$, м/с	φ	Комментарии
25 июля	21,2–22,5	1,3	15,7–26,6	10,9	1–2	4	ВЮВ	Внутрисуточный ход слабо выражен из-за усиления ветра после 09:00
30 июля	20,5–23	2,5	13,4–24	10,6	0–1	4–6	СВ	Сгонно-нагонные явления: нагон — ст. 6–7, 18–21, сгон — ст. 9–12
2 августа	22,2–24,6	2,4	18,1–30,1	12	0–1	4–5	С, ЗСЗ	Слабо выражен суточный ход с мин. около 12:00 на ст. 10–12 из-за усиления С ветра и с макс. на ст. 20–22 в 14:00 при северном ветре
3 августа	22,3–24,8	2,5	19,3–29,6	10,3	0–1	2–3	З	Слабо выражен суточный ход с макс. у ст. 14 и с мин. на ст. 18 из-за ССЗ ветра
7 августа	22,0–23,5	0,96	17,8–24,0	6,2	1–2	3–5	СЗ	Макс. на ст. 22–24; нагон от берега при 5 м/с с наложением на суточный ход
10 августа	21,0–22,0	1	15,9–26,6	10,7	1–2	4–6	ЗСЗ	Короткий рейс с 09:00 до 12:00; выражено увеличение T_0
12 августа	21,6–22,4	0,8	16,5–27,5	11	1–2	3–4	ЗСЗ	Короткий рейс с 11:00 до 13:00; не выражено увеличение T_0
14 августа	20,3–21,3	1	13,9–22,5	8,6	1–3	5–7	З	Внутрисуточный ход не выражен из-за сильного ветра; мин. T_0 на ст. 4, 5, 18 в 11:00–11:30 из-за сильного З ветра
22 августа	19,3–19,6	0,33	12,4–16,3	3,9	2–3	7–9	СЗ	Внутрисуточный ход не выражен из-за сильного ветра и похолодания
27 августа	19,7–21,4	1,7	11,1–27,2	16,1	2–3	5–6	ЮВ	Выражен внутрисуточный ход с мин. на ст. 14–17 в 13:00–13:30 при усилении U, также возможно влияние речной водной массы р. Санахты
21 сентября	16,3–17,4	1,1	12,4–22,3	9,9	0–2	3–5	З	Внутрисуточный ход не выражен
15 октября	8,99–10,6	1,61	10,1–17,7	7,6	2–3	5	СЗ	Выражено уменьшение T_0 с 12:00 до 17:00, на фоне которого имеются минимумы на ст. 5, 6 и 14–16 при усилении ЗСЗ ветра

Особенно велика пространственная неравномерность поля температуры воды весной в начале периода наблюдений, а также в антициклоническую погоду с малыми скоростями ветра и значительным ростом температуры воздуха в дневное время 17 мая, 22 июня, 3 июля, 2–3 августа (см. *рис. 3а*). Между пространственной неоднородностью и внутрисуточной амплитудой температуры воздуха имеется положительная статистически значимая связь (см. *рис. 3б*): $R = 0{,}65$ (коэффициент детерминации), $n = 24$ (количество станций). Наименьший вертикальный градиент температуры воды характерен для станций 4, 14, 24, расположенных над затопленным руслом (что, по-видимому, связано со стоковым течением), а наибольший — для станций 11, 15, 19, 22, 25, что может быть связано со сгонно-нагонными явлениями и влиянием притока речных вод для станций вблизи берега или в приустьевых заливах.

Сравнение данных температуры поверхности воды, измеренных во время рейсов, со значениями, полученными по космическим снимкам, показало хорошие результаты (*табл. 2*). Наибольшие средние отклонения отмечены 15 и 22 мая (более 4 °C). Эти даты приходятся на периоды с наибольшей пространственной неоднородностью поля температуры поверхности. Наиболее близкие к результатам измерений значения по спутниковым данным получены в августе.

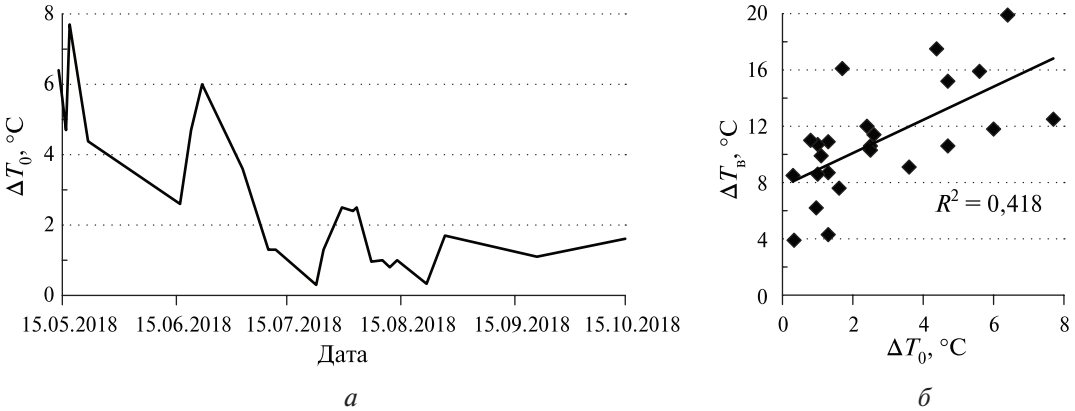

Рис. 3. Изменение пространственной неоднородности температуры поверхности воды (ΔT_0, °C) в течение сезона (*а*) и её связь с амплитудой температуры воздуха (ΔT, °C) (*б*)

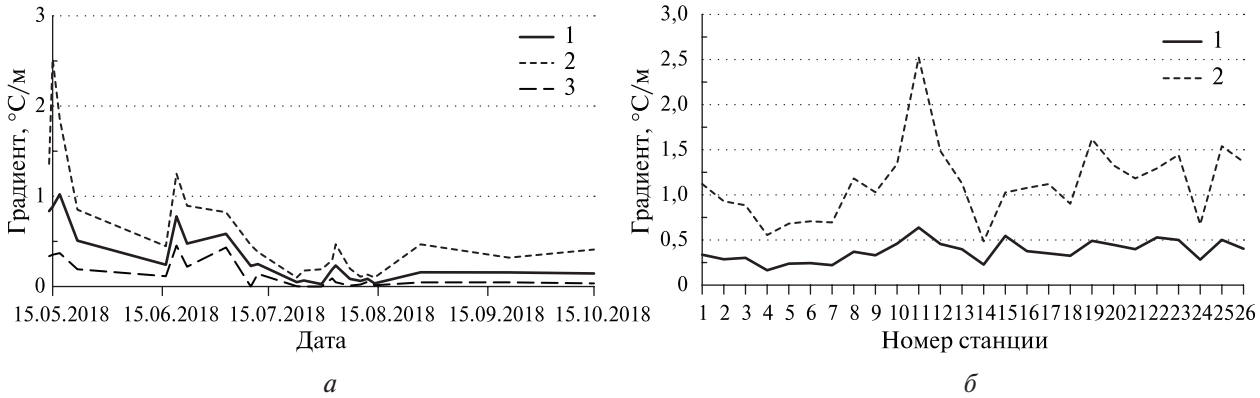

Рис. 4. Изменение среднего (1), максимального (2) и минимального (3) значений вертикального градиента температуры воды (Grad, °C/м), осреднённого по станциям (*а*); средний (1) и максимальный (2) вертикальный градиент температуры воды на станциях за период наблюдений (*б*)

Таблица 2. Результаты сравнения температуры поверхности воды, восстановленной по спутниковым данным и измеренной на станциях (ΔT — среднее отклонение, t — критерий Тейла, n — число станций)

Дата	ΔT	t	n
15 мая	4,20	0,11	25
22 мая	2,05	0,06	26
16 июня	2,61	0,12	25
22 июня (снимок 23 июня)	4,25	0,10	8
3 августа	1,99	0,04	24
10 августа	0,93	0,02	7
27 августа (снимок 26 августа)	1,12	0,03	24

Значительно дополнить полученные результаты сравнения, придав результату статистическую обоснованность, оказалось возможным с помощью привлечения данных измерений температуры воды непрерывно по треку судна в дни спутниковой съёмки: 15 и 22 мая, 16 июня, 3 и 10 августа. На *рис. 5* (см. с. 223) в левом столбце представлены результаты восстановления температуры поверхности воды по спутниковым снимкам в единой температурной шкале для указанных дней, а в правом столбце приведены результаты сравнения с судовыми измерениями по треку судна (отмечен чёрной кривой). При построении использовано усреднение судовых данных по размеру пикселя в ИК-каналах, равному 100 м. Оценки показали, что в зависимости от направления ориентации трека судна в пиксель попадало до 33 судовых отсчётов.

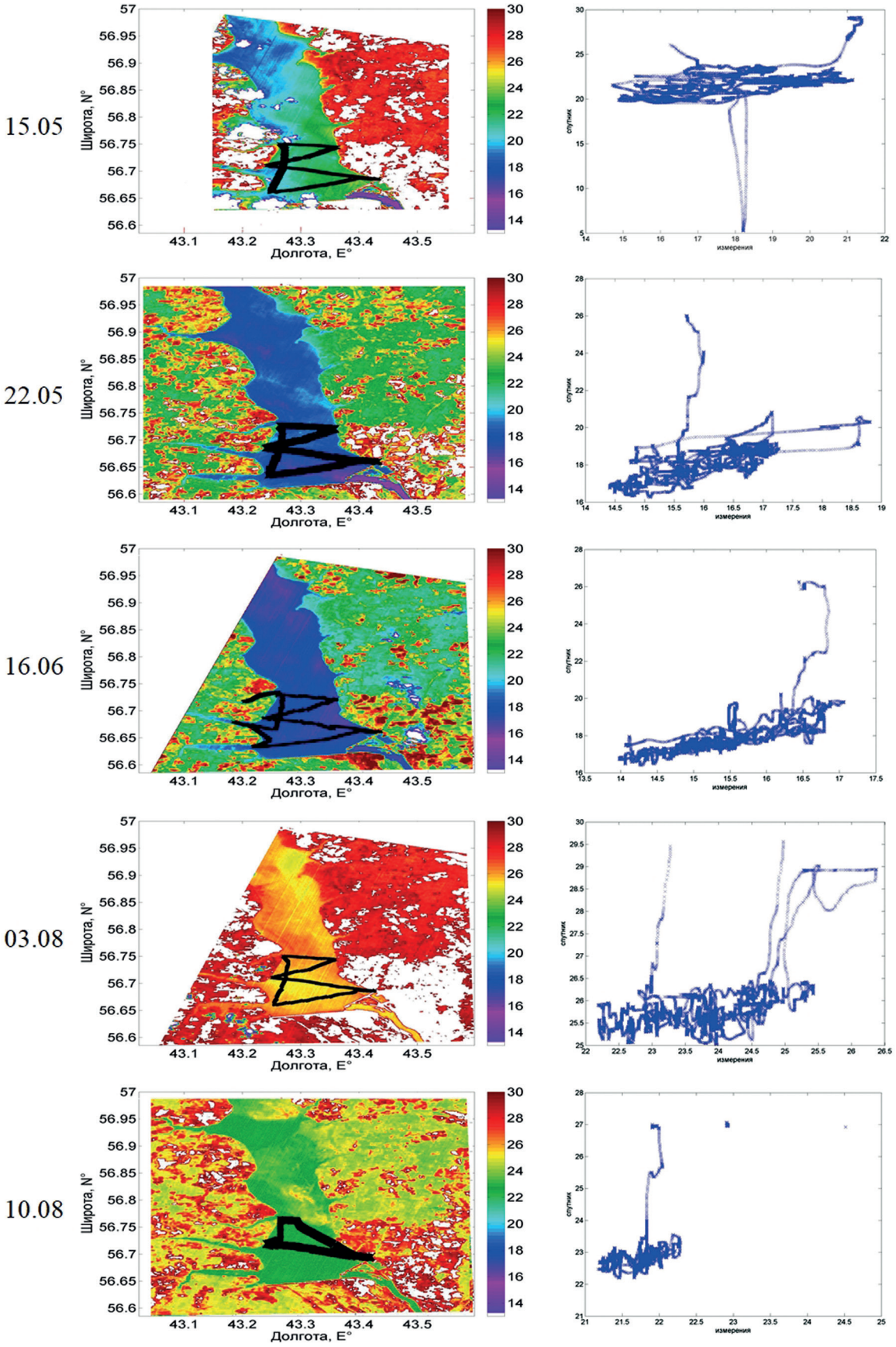

Рис. 5. Температура поверхности воды, восстановленная по спутниковым изображениям (*левый столбец*) и её сравнение с результатами измерений по треку судна, отмеченному чёрной кривой (*правый столбец*)

На *рис. 6* градацией красного представлены результаты расчёта температурной разности $\Delta = T_в - T_0$ (°C), полученной по спутниковым изображениям $T_в$ и *in situ* измерениям T_0, наложенные на батиметрию водоёма.

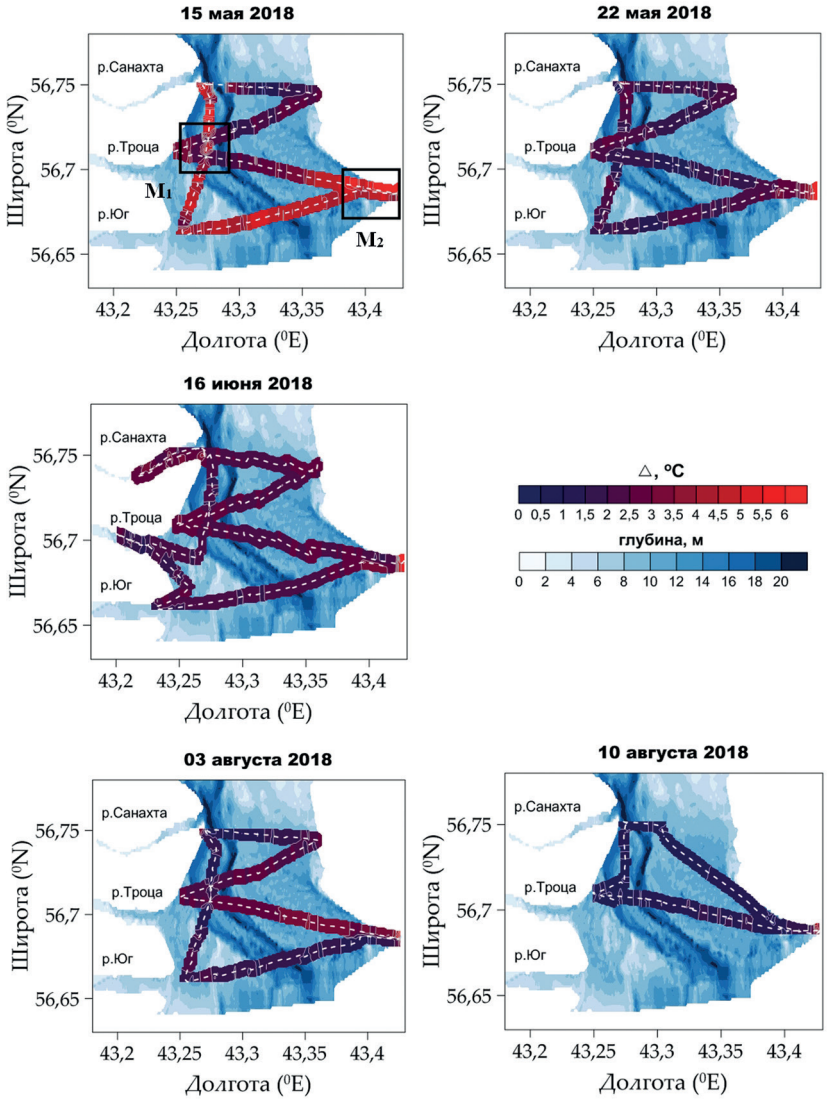

Рис. 6. Разность значений температуры поверхности воды (°C), вычисленной по спутниковым данным и полученной из контактных измерений вдоль трека судна

Видно, что в среднем спутниковый алгоритм даёт переоценку в 1–2 °C, хотя в отдельные дни она может достигать 4–6 °C (например, 15 мая). Эта переоценка может значительно возрастать в непосредственной близости (порядка 50–100 м) от берегов (например, станция 15 в устье р. Санахты или акватория аванпорта, где начинался и заканчивался трек судна (яркие красные пятна на *рис. 6* с правой стороны)), достигая значений 10 °C. Наиболее вероятная причина этого кроется во влиянии суши в алгоритмах спутниковой обработки, поскольку глубины в этих районах велики (15–20 м) и влиянием дна на яркость пикселя изображения можно пренебречь. При исключении из массива таких районов результаты восстановления температуры поверхности воды на открытой акватории по спутниковым данным адекватны, и качество воспроизведения увеличивается с середины мая до середины августа (*табл. 3*).

Вместе с тем установлено, что суточная изменчивость температуры воды также может приводить к значительным ошибкам при использовании спутниковых данных. Рассмотрим этот эффект на примере двух районов: M_1 и M_2, обозначенных квадратами на *рис. 6*. Район M_1

включает двукратное пересечение треков, обозначенное буквами A и B, а район M_2 — близкие траектории, ограниченные отрезком CD (*рис. 7*).

Таблица 3. Результаты сравнения спутниковых данных с измерением температуры поверхности при движении судна (ΔT — среднее отклонение, t — критерий Тейла, n — число станций)

Дата	ΔT	T	n
15 мая	3,20	0,08	24 354
22 мая	2,01	0,06	27 799
16 июня	2,36	0,07	34 613
3 августа	2,06	0,04	21 733
10 августа	1,06	0,02	23 844

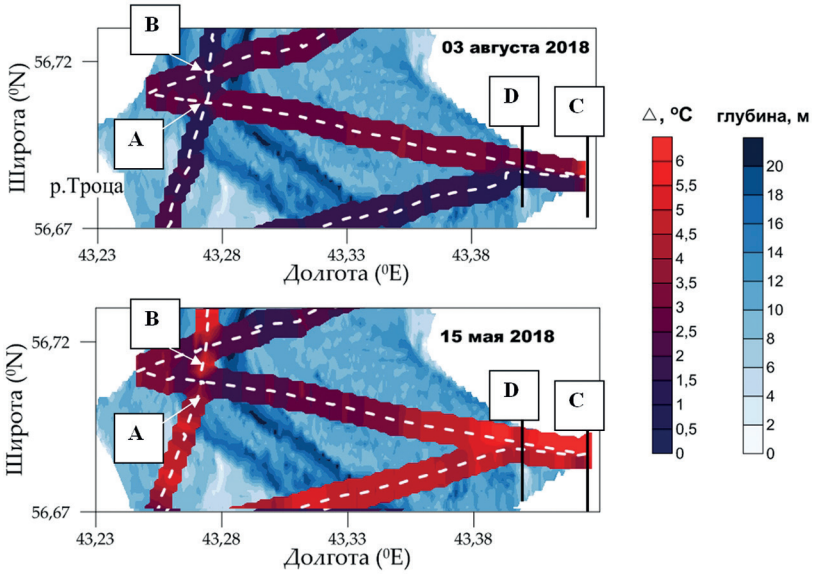

Рис. 7. Суточная изменчивость температуры воды на масштабах 3–4 ч 3 августа и 15 мая 2018 г.

Таблица 4. Изменение температуры воды на точках маршрута судна в течение рейсов

Станция, время	T, °C	Станция, время	T, °C
15 мая			
A1, 11:19:21	17,84	B1, 12:05:06	18,92
A2, 15:32:14	15,93	B2, 15:26:14	16,28
22 мая			
A1, 10:49:48	17,06	B1, 11:39:57	16,23
A2, 14:20:01	16,80	B2, 14:14:16	17,02
16 июня			
A1, 10:51:32	14,93	B1, 11:37:23	14,94
A2, 15:41:13	15,40	B2, 15:37:13	15,56
3 августа			
A1, 09:36:07	22,83	B1, 10:13:53	23,43
A2, 14:20:01	23,80	B2, 12:35:31	24,23
C1, 08:21:16	23,07	D1, 08:29:48	23,11
C2, 14:32:26	24,89	D2, 14:41:37	24,57

Проходы судна через эти районы производились дважды в день: до и после полудня. В эти сроки измеренная температура воды была разной (*табл. 4*). Наименьшие отличия (не более 1 °C) были характерны для дней с относительно прохладной ветреной погодой (22 мая и 16 июня). В жаркую маловетреную погоду измерения в одних и тех же координатах за время рейса могут различаться более чем на 2,5 °C. Причём 15 мая наибольшие значения температуры воды зафиксированы до полудня, а 3 августа — во второй половине дня. Данное наблюдение свидетельствует, что термический режим внутренних водоёмов сильно изменчив, особенно в периоды антициклонической погоды. Поэтому пользоваться данными, которые были получены слишком далеко по времени от момента спутниковой съёмки, нежелательно, а при верификации данных температуры воды, полученной по снимкам, необходимо учитывать пространственно-временную изменчивость поля температуры, зависящую от синоптических условий и фазы водного режима.

Выводы

В работе представлены результаты ассимиляции данных судовых измерений и спутниковых данных для исследования сезонной и суточной изменчивости температуры воды в Горьковском вдхр. на примере результатов измерений 2018 г. Так, анализом вертикальных профилей температуры воды, собранных с мая по октябрь 2018 г., установлено, что наименьшая вертикальная изменчивость характерна для станций над затопленным руслом, наибольшая — для станций вблизи берега или в приустьевых заливах, что обусловлено сгонно-нагонными явлениями и влиянием притока речных вод. При этом наибольшая пространственная изменчивость поля температуры воды наблюдалась до середины июля 2018 г. в приплотинном районе Горьковского вдхр. Значительно дополнить полученные результаты оказалось возможным с помощью привлечения данных измерений температуры воды непрерывно по треку судна в дни спутниковой съёмки Landsat-8/OLI. Установлено, что в среднем спутниковый алгоритм даёт переоценку в 1–2 °C, хотя в отдельные дни она может достигать 4–6 °C, а вблизи берегов (на удалении от них в 50–100 м) — 10 °C. К значительным ошибкам (до 2,5 °C) при оценке температуры воды по спутниковым данным может приводить использование данных подспутниковых измерений, выполненных позднее спутниковой съёмки на 3–4 ч (и более), в связи с суточным прогревом поверхности. Полученные результаты свидетельствуют, что термический режим внутренних водоёмов сильно изменчив, особенно в периоды антициклонической погоды. Об этом необходимо помнить при анализе восстановленных по спутниковым данным значений температуры воды, а при верификации спутниковых данных нужно использовать максимально близкие к моменту съёмки результаты подспутниковых измерений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-05-00715) и Русского географического общества (проект № 07/2020-Р).

Литература

1. *Алескерова А. А.*, *Кубряков А. А.*, *Станичный С. В.* Двухканальный метод восстановления температуры поверхности Черного моря по измерениям Landsat-8 // Исслед. Земли из космоса. 2016. Т. 4. С. 57–64.
2. *Буторин Н. В.* Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада. Л.: Наука, 1969. 322 с.
3. *Шульга Т. Я.*, *Суслин В. В.*, *Шукало Д. М.*, *Ингеров А. В.* Связь изменчивости полей солености в Азовском море с данными спутниковых измерений в видимом диапазоне спектра // Тр. 10-й Юбилейной Всероссийской конф. «Современные проблемы оптики естественных вод». СПб.: ОАО «Изд-во «Химиздат», 2019. С. 263–267.
4. *Эдельштейн К. К.* Формирование, перемещение и трансформация водных масс Горьковского водохранилища // Химизм внутренних водоёмов и фактор их загрязнения и самоочищения. 1968. Вып. 18. № 21. С. 3–69.

5. *Adrian R.*, *O'Reilly C.*, *Zagarese H.*, *Baines S.*, *Hessen D.*, *Kelle W.*, *Livingstone D.*, *Sommaruga R.*, *Straile D.*, *Van Donk E.*, *Weyhenmeyer G.*, *Winder M.* Lakes as sentinels of climate change // Limnology and Oceanography. 2009. V. 54. No. 6. P. 2283–2297.
6. *Goldman C. R.*, *Jassby A. D.*, *Hackley S. H.* Decadal, interannual, and seasonal variability in enrichment bioassays at Lake Tahoe, California-Nevada, USA // Canadian J. Fisheries and Aquatic Sciences. 1993. V. 50. P. 1489–1496.
7. *Hansen C. H.*, *Burian S. J.*, *Dennison P. E.*, *Williams G. P.* Spatiotemporal Variability of Lake Water Quality in the Context of Remote Sensing Models // Remote Sensing. 2017. V. 9. No. 55: 409.
8. *Hosoda K.*, *Murakami H.*, *Sakaida F.*, *Kawamura H.* Algorithm and validation of sea surface temperature observation using MODIS sensors aboard terra and aqua in the western North Pacific // J. Oceanography. 2007. V. 63. No. 2. P. 267–280.
9. *MacCallum S. N.*, *Merchant C. J.* Surface water temperature observations of large lakes by optimal estimation // Canadian J. Remote Sensing. 2012. V. 38. No. 1. P. 25–45.
10. *Molkov A. A.*, *Pelevin V. V.*, *Korchemkina E. N.* Approach of non-station-based in situ measurements for high resolution satellite remote sensing of productive and highly changeable inland waters // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13. № 2. С. 60–68.
11. *Mueller J. L.*, *Bidigare R. R.*, *Trees C.*, *Balch W. M.*, *Dore J.*, *Drapeau D. T.*, *Karl D.*, *Van Heukelem L.*, *Perl J.* Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 5, V. 5: Biogeochemical and Bio-Optical Measurements and Data Analysis Protocols / Goddard Space Flight Space Center. Greenbelt, MD, 2003. P. 5–24.
12. *Palmer S. C. J.*, *Kutser T.*, *Hunter P. D.* Remote sensing of inland waters: Challenges, progress and future directions // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 157. P. 1–8.
13. *Sharma S.*, *Gray D. K.*, *Read J. S.*, *O'Reilly C. M.*, *Schneider P.*, *Qudrat A.*, *Gries C.*, *Stefanoff S.*, *Hampton S. E.*, *Hook S.*, *Lenters J. D.*, *Livingstone D. M.*, *McIntyre P. B.*, *Adrian R.*, *Allan M. G.*, *Anneville O.*, *Arvola L.*, *Austin J.*, *Bailey J.*, *Baron J. S.*, *Brookes J.*, *Chen Y.*, *Daly R.*, *Dokulil M.*, *Dong B.*, *Ewing K.*, *de Eyto E.*, *Hamilton D.*, *Havens K.*, *Haydon S.*, *Hetzenauer H.*, *Heneberry J.*, *Hetherington A. L.*, *Higgins S. N.*, *Hixson E.*, *Izmest'eva L. R.*, *Jones B. M.*, *Kangur K.*, *Kasprzak P.*, *Koster O.*, *Kraemer B. M.*, *Kumagai M.*, *Kuusisto E.*, *Leshkevich G.*, *May L.*, *MacIntyre S.*, *Muller-Navarra D.*, *Naumenko M.*, *Noges P.*, *Noges T.*, *Niederhauser P.*, *North R. P.*, *Paterson A. M.*, *Plisnier P.-D.*, *Rigosi A.*, *Rimmer A.*, *Rogora M.*, *Rudstam L.*, *Rusak J. A.*, *Salmaso N.*, *Samal N. R.*, *Schindler D. E.*, *Schladow G.*, *Schmidt S. R.*, *Schultz T.*, *Silow E. A.*, *Straile D.*, *Teubner K.*, *Verburg P.*, *Voutilainen A.*, *Watkinson A.*, *Weyhenmeyer G. A.*, *Williamson C. E.*, *Woo K. H.* A global database of lake surface temperatures collected by in situ and satellite methods from 1985–2009 // Scientific Data. 2015. V. 2. Art. No. 150008. 19 p.
14. *Soomets T.*, *Jakovels D.*, *Zagars M.*, *Brauns A.*, *Uudeberg K.*, *Reinart A.*, *Kutser T.* Comparison of Lake Optical Water Types Derived from Sentinel-2 and Sentinel-3 // Remote Sensing. 2019. V. 1(23), Art. No. 2883, 16 p.
15. *Williamson C. E.*, *Saros J. E.*, *Vincent W. F.*, *Smold J. P.* Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change // Limnology and Oceanography. 2009. V. 54. No. 6. P. 2273–2282.

Investigation of seasonal changes in water temperature in lake part of Gorky Reservoir in 2018 based on *in situ* measurements and high-resolution satellite images

A. A. Molkov [1, 2], M. G. Grechushnikova [3], I. A. Kapustin [1, 2], G. V. Leshchev [1], A. A. Aleskerova [4], M. Yu. Grishchenko [3]

[1] *Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia*
E-mail: a.molkov@inbox.ru

[2] *Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod 603950, Russia*
E-mail: kapustin-i@yandex.ru

[3] *Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*
E-mail: allavis@mail.ru

[4] *Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia*
E-mail: annete08@mail.ru

The main goal of current investigation is the analysis of spatio-temporal variability of water temperature in dam area of the Gorky Reservoir from May to October 2018 using ship measurements and Landsat-8/OLI images. Here we demonstrate variability of the vertical gradient of water temperature and its dependence on meteorological conditions in different parts of the water study area. Also, the seasonal spatial variability of water surface temperature is analyzed and examples of its retrieval by satellite images are presented. Accuracy of such retrieval was obtained for different parts of the reservoir and depending on meteorological conditions. Based on these results, we concluded that it is necessary to carefully use in-situ data obtained later than satellite imagery, taking into account the spatial and temporal variability of water temperature, which depends on synoptic conditions and the phase of the water reservoir regime. Presented results can be useful in analysis of archived satellite images to retrieve interannual and seasonal variability of water temperature with a high spatial resolution on scales exceeding the capabilities of traditional station measurements.

Keywords: remote sensing, satellite monitoring, Landsat-8, water temperature, Gorky Reservoir

Accepted: 28.01.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-216-229

References

1. Aleskerova A. A., Kubryakov A. A., Stanichny S. V., A two-channel method for retrieval of the Black Sea surface temperature from Landsat-8 measurements, *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, Vol. 52, No. 9, pp. 1155–1161.
2. Butorin N. V., *Gidrologicheskie protsessy i dinamika vodnykh mass v vodokhranilishchakh Volzhskogo kaskada* (Hydrological processes and dynamics of water masses in reservoirs of Volga cascade), Leningrad: Nauka, 1969, 322 p. (in Russian).
3. Shulga T. Ya., Suslin V. V., Shukalo D. M., Ingerov A. V., Relationship between the variability of salinity fields in the Sea of Azov and satellite measurements in the visible range of the spectrum, *Trudy 10i Yubileinoi Vserossiiskoi konferentsii "Sovremennye problemy optiki estestvennykh vod"* (Current problems of optics of natural waters: Proc. 10th Anniversary All-Russia Conf.), Saint Petersburg: OAO "Izdatel'stvo "Khimizdat", 2019, pp. 263–267 (in Russian).
4. Edelstein K. K., Formation, movement and transformation of water masses of the Gorky reservoir, *Khimizm vnutrennikh vodoemov i faktor ikh zagryazneniya i samoochishcheniya*, 1968, Vol. 18, No. 21, pp. 3–69 (in Russian).
5. Adrian R., O'Reilly C., Zagarese H., Baines S., Hessen D., Keller W., Livingstone D., Sommaruga R., Straile D., Van Donk E., Weyhenmeyer G., Winder M., Lakes as sentinels of climate change, *Limnology and Oceanography*, 2019, Vol. 54, No. 6, pp. 2283–2297.
6. Goldman C. R., Jassby A. D., Hackley S. H., Decadal interannual, and seasonal variability in enrichment bioassays at Lake Tahoe, California-Nevada, USA, *Canadian J. Fisheries and Aquatic Sciences*, 1993. Vol. 50, pp. 1489–1496.

7. Hansen C. H., Burian S. J., Dennison P. E., Williams G. P., Spatiotemporal Variability of Lake Water Quality in the Context of Remote Sensing Models, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, No. 5: 409.
8. Hosoda K., Murakami H., Sakaida F., Kawamura H., Algorithm and validation of sea surface temperature observation using MODIS sensors aboard terra and aqua in the western North Pacific, *J. Oceanography*, 2007, Vol. 63, No. 2, pp. 267–280.
9. MacCallum S. N., Merchant C. J., Surface water temperature observations of large lakes by optimal estimation, *Canadian J. Remote Sensing*, 2012, Vol. 38, No. 1, pp. 25–45.
10. Molkov A. A., Pelevin V. V., Korchemkina E. N., Approach of non-station-based in situ measurements for high resolution satellite remote sensing of productive and highly changeable inland waters, *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2020, Vol. 13, No. 2, pp. 60–68.
11. Mueller J. L., Bidigare R. R., Trees C., Balch W. M., Dore J., Drapeau D. T., Karl D., Van Heukelem L., Perl J., *Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation*, *Revision 5*, *Vol. 5: Biogeochemical and Bio-Optical Measurements and Data Analysis Protocols*, Goddard Space Flight Space Center, Greenbelt, MD, 2003, pp. 5–24.
12. Palmer S. C. J., Kutser T., Hunter P. D., Remote sensing of inland waters: Challenges, progress and future directions, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 157, pp. 1–8.
13. Sharma S., Gray D. K., Read J. S., O'Reilly C. M., Schneider P., Qudrat A., Gries C., Stefanoff S., Hampton S. E., Hook S., Lenters J. D., Livingstone D. M., McIntyre P. B., Adrian R., Allan M. G., Anneville O., Arvola L., Austin J., Bailey J., Baron J. S., Brookes J., Chen Y., Daly R., Dokulil M., Dong B., Ewing K., de Eyto E., Hamilton D., Havens K., Haydon S., Hetzenauer H., Heneberry J., Hetherington A. L., Higgins S. N., Hixson E., Izmest'eva L. R., Jones B. M., Kangur K., Kasprzak P., Koster O., Kraemer B. M., Kumagai M., Kuusisto E., Leshkevich G., May L., MacIntyre S., Muller-Navarra D., Naumenko M., Noges P., Noges T., Niederhauser P., North R. P., Paterson A. M., Plisnier P.-D., Rigosi A., Rimmer A., Rogora M., Rudstam L., Rusak J. A., Salmaso N., Samal N. R., Schindler D. E., Schladow G., Schmidt S. R., Schultz T., Silow E. A., Straile D., Teubner K., Verburg P., Voutilainen A., Watkinson A., Weyhenmeyer G. A., Williamson C. E., Woo K. H., A global database of lake surface temperatures collected by in situ and satellite methods from 1985–2009, *Scientific Data*, 2015, Vol. 2, Art. No. 150008, 19 p.
14. Soomets T., Jakovels D., Zagars M., Brauns A., Uudeberg K., Reinart A., Kutser T., Comparison of Lake Optical Water Types Derived from Sentinel-2 and Sentinel-3, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11(23), Art. No. 2883, 16 p.
15. Williamson C. E., Saros J. E., Vincent W. F., Smold J. P., Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change, *Limnology and Oceanography*, 2009, Vol. 54, No. 6, pp. 2273–2282.