Дистанционное зондирование и аналитическое моделирование температурного режима реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС

А. К. Матузко [1], Н. Я. Шапарев [1], О. Э. Якубайлик [2]

[1] *Институт вычислительного моделирования СО РАН*
Красноярск, 660036, Россия
E-mail: akmatuzko@icm.krasn.ru
[2] *Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, 660036, Россия*
E-mail: oleg@icm.krasn.ru

Зарегулирование стока реки Енисей Красноярской ГЭС привело к значительным изменениям гидротермического режима в нижнем бьефе. Существующая система мониторинга температуры воды, основанная на дискретных измерениях на гидропостах, не обеспечивает достаточной пространственно-временной детализации, необходимой для современных задач социально-экономического развития бассейна Енисея и арктических территорий Красноярского края. В данной работе предложен комплексный подход, сочетающий методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и аналитического моделирования для оценки температурного режима реки. В качестве данных ДЗЗ использованы материалы тепловой инфракрасной съёмки Landsat-8/-9 C2 L2SP (*англ.* Collection 2 Level 2 Science Product), обеспечивающие высокую точность за счёт учёта атмосферных параметров. Аналитическое моделирование гидротермического режима выполнено на основе решения уравнения теплопроводности, где учитывались солнечная и тепловая инфракрасная радиация, конвекция и испарение. Морфометрические характеристики русла получены по спутниковым снимкам высокого разрешения QuickBird. Результаты показали высокую степень согласованности расчётной температуры данным гидропостов, а также результатам вычислений температуры воды по спутниковым данным Landsat. Предложенный подход позволит существенно улучшить пространственно-временное разрешение мониторинга температурного режима реки. Вместе с тем был выявлен ряд ограничений, связанных периодичностью спутниковой съёмки, облачностью и пространственным разрешением тепловых каналов Landsat.

Ключевые слова: температура воды, Енисей, Landsat-8/-9, ДЗЗ, гидропосты, аналитическое моделирование

Одобрена к печати: 03.09.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-346-356

Введение

Спутниковые данные о температуре воды предоставляют широкий спектр возможностей для исследования океанов, климата и окружающей среды. Получаемые данные служат надёжным фундаментом для проведения научных исследований как глобальных, так и локальных процессов по изучению морей и озёр (Ложкин, Шевченко, 2022; Пармузин и др., 2024; Степаненко и др., 2024). Температурный режим рек является важным показателем экологического состояния водных экосистем, так как влияет на биохимические процессы, условия обитания гидробионтов и качество воды (Caissie, 2006; Sinokrot, Stefan, 1993; Wawrzyniak et al., 2012; Webb et al., 2008; Yang et al., 2005). Традиционные методы измерения температуры воды, основанные на использовании гидропостов, обладают высокой точностью, но ограничены в пространственном и временном охвате (Dingman, 2015). В связи с этим всё большее значение приобретают методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), позволяющие получать данные о температуре поверхности воды на обширных территориях с высокой периодичностью.

Спутниковый мониторинг, в частности с использованием тепловых инфракрасных снимков Landsat ETM+ (*англ.* Enhanced Thematic Mapper Plus), доказал свою эффективность в исследованиях термического режима рек. Так, Р. Н. Хэндкок с соавторами (Handcock et al.,

2006) оценили точность таких измерений на разных пространственных масштабах и её зависимость от ширины русла реки, показав, что спутниковые данные могут успешно применяться для анализа температурной динамики.

Следует отметить, что изменение гидротермического режима, вызванное дамбами, впервые было оценено с помощью спутниковой технологии для реки Янцзы (Ling et al., 2017) и реки Енисей (Shaparev et al., 2018). В работе других авторов (Yang et al., 2005) были применены спутниковые данные для изучения изменений температуры реки Лены, что подтвердило ценность дистанционных методов в условиях труднодоступных регионов. Таким образом, спутниковый мониторинг предоставляет качественный инструмент для изучения термического режима рек.

Река Енисей занимает по водостоку (около 600 км^3/год) первое место в России и шестое место в мире (Dingman, 2015). Территория Красноярского края в основном расположена в бассейне этой реки, что играет важную роль для экономики региона. В 1972 г. на Енисее была построена Красноярская гидроэлектростанция (ГЭС) и город Красноярск оказался в нижнем бьефе. Зарегулирование реки привело к изменению гидрофизических, гидрологических, гидробиологических, гидрохимических процессов и рекреационных возможностей (Космаков, 2001; Шапарев, Андрианова, 2018). Определяющим фактором является изменение температуры воды, которая влияет на многие экономические и экологические аспекты. Контроль температуры воды в реке осуществляется на гидропостах, расстояние между которыми достигает нескольких десятков, а иногда и сотен километров. Этого явно недостаточно при современном освоении обширных территорий и арктических зон Красноярского края. Поэтому необходимо увеличение возможностей пространственно-временного контроля температуры воды. В настоящей работе предлагается для этого использование методов дистанционного зондирования температуры воды на основе спутниковых данных Landsat-8/-9 и аналитического моделирования гидротермических процессов, основанного на решении уравнения теплопроводности.

Объект, инструменты и методы исследования

Объектом исследования является температурный режим реки Енисей в нижнем бьефе Красноярской ГЭС (*рис. 1*, см. с. 348). Измерение температуры воды выполняется в следующих пунктах: 1 — город Дивногорск (2 км от плотины Красноярской ГЭС); 2 — Красноярск (40 км); 3 — село Есаулово (77 км); 4 — село Атаманово (124 км). В пунктах 1, 2, 4 находятся гидропосты, измеряющие температуру воды в 08:00 и 20:00.

Измерение температуры воды в тепловом инфракрасном диапазоне TIR (*англ.* Thermal Infrared) выполнялось на основе данных со спутников Landsat-8/-9 для 2016, 2022 и 2024 гг. По сравнению с измерениями на гидропостах метод ДЗЗ представляет привлекательную альтернативу для количественной оценки характеристик температуры воды в различных пространственных масштабах. Например, спутниковые изображения среднего пространственного разрешения, такие как тепловое инфракрасное изображение Landsat, использовались для получения качественных тепловых продольных и временных моделей рек (Wawrzyniak et al., 2012).

Спутник Landsat-8 выведен на орбиту 11 февраля 2013 г., на нём установлено два сканера — OLI (*англ.* Operational Land Imager) и TIRS (*англ.* Thermal Infrared Sensor). Сканер теплового диапазона TIRS ведёт съёмку в двух каналах 10,6–11,2 мкм (10-й канал) и 11,5–12,5 мкм (11-й канал), пространственное разрешение составляет 100 м. Дата запуска Landsat-9 — 27 сентября 2021 г. Landsat-9 работает в паре с Landsat-8, во многом повторяет его характеристики, вместе они обеспечивают съёмку всей Земли каждые 8 дней. Время съёмки в Красноярске 11:52.

Температура поверхности воды является ключевым элементом в характеристике термодинамики водоёмов, а тепловые инфракрасные изображения Landsat — один из лучших источников информации для её получения. Существует несколько алгоритмов извлечения

температуры поверхности, применяемых к данным инфракрасного датчика Landsat (Li et al., 2013; Vanhellemont et al., 2020). На практике чаще всего используют такие алгоритмы, как уравнение переноса излучения (Sekertekin, 2019; Yu et al., 2014), одноканальный (Jimenez-Munoz et al., 2009) и монооконный (Simon et al., 2014; Wang et al., 2015).

Рис. 1. Контрольные пункты в нижнем бьефе Красноярской ГЭС

До марта 2021 г. в стандартном перечне информационных продуктов Landsat не было готового набора данных с температурой поверхности. По этой причине для установления температуры необходимо было проводить определённую последовательность вычислений, с использованием дополнительных данных по состоянию атмосферы и подстилающей поверхности (Рис, 2006). Подробно порядок вычислений представлен в работе авторов (Matuzko, Yakubailik, 2018), где на примере Красноярска описано применение метода классификации подстилающей поверхности на четыре класса (вода, растительность, строения, открытая почва).

В марте 2021 г. представители Геологической службы США USGS (*англ.* United States Geological Survey) внедрили для Landsat-8/-9 вспомогательные данные спутника ASTER (*англ.* Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), где был заимствован коэффициент эмиссии, который использовался для определения температуры поверхности. Эти данные были собраны в новый набор с названием C2L2 (*англ.* Collection 2 Level 2) (http://landsat.usgs.gov/landsat8.php).

Новый продукт для определения температуры поверхности Landsat-8/-9 Collection 2 L2SP (*англ.* Level 2 Science Product) признан на международном уровне готовым к анализу пространственных данных. Эта сертификация признает обработанные спутниковые данные качественными и готовыми для проведения анализа, так как вся необходимая коррекция, в том числе и атмосферная, выполнена специалистами USGS. В продуктах L2SP атмосферная коррекция осуществляется с помощью алгоритма LaSRC (*англ.* Landsat Surface Reflectance Code), который включает следующие ключевые этапы: 1. Коррекция молекулярного рассеивания в атмосфере. 2. Учёт аэрозолей — используется модель AERONET и данные об оптической толщине аэрозолей AOT (*англ.* Aerosol Optical Thickness) из системы MAIAC (*англ.* MODIS Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction; *англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer — MODIS) (Lyapustin et al., 2018). 3. Учёт коррекции водяного пара.

4. Топографическая коррекция — учитывает влияние рельефа на освещённость. Результатом является поверхностная отражательная способность SR (*англ.* Surface Reflectance), очищенная от атмосферных эффектов. Коррекция выполняется специалистами USGS и доступна для загрузки на сайте EarthExplorer для дальнейшей работы пользователей.

Также в этом продукте L2SP содержатся дополнительные атмосферные данные из внешних источников — это такие параметры, как тепловое излучение Земли L_{th} (в Вт·м$^{-2}$·ср$^{-1}$·мкм$^{-1}$) (*англ.* thermal radiance), восходящее излучение от атмосферы L_{uw} (в Вт·м$^{-2}$·ср$^{-1}$·мкм$^{-1}$) (*англ.* upwelled radiance), спектральный коэффициент пропускания атмосферы τ (*англ.* atmospheric transmittance), нисходящее солнечное излучение L_{dw} (в Вт·м$^{-2}$·ср$^{-1}$·мкм$^{-1}$) (*англ.* downwelled radiance). Этих данных достаточно для определения температуры поверхности суши и воды.

На точность определения температуры по спутниковым данным влияют различные факторы, в том числе излучательная способность поверхности Земли, атмосферные условия, углы возвышения Солнца. Многочисленные сравнения с данными наземных измерений показывают, что среднеквадратичная ошибка в определении температуры LST (*англ.* Land Surface Temperature) как правило находится в пределах от 1 до 3–4 °C (Kirner et al., 2024). В значительной степени эта ошибка обусловлена неточностями в расчёте атмосферной коррекции. Как правило, это проявляется в систематическом сдвиге значений температуры LST на несколько градусов. В то же время в идеальных условиях (ясное безоблачное небо, минимальное влияние атмосферы) погрешность может быть менее 1 °C.

Отдельно стоит обратить внимание на то, что относительная погрешность определения температуры поверхности между разными пикселями в пределах одной сцены Landsat (внутрисценовая относительная погрешность) обычно значительно ниже, чем абсолютная погрешность для всего изображения — это связано с тем, что ошибки калибровки атмосферной коррекции одинаково влияют на все пиксели сцены. Для однородных поверхностей типа поверхность воды она может быть очень низкой (0,1–0,5 °C). При этом порог чувствительности Landsat TIRS (минимальная разность температуры, которую может зафиксировать сенсор NETD (*англ.* Noise Equivalent Temperature Difference)) не превышает 0,05 °C (Montanaro et al., 2014). По данным Н. К. Малакара с соавторами (Malakar et al., 2018), точность измерений температуры Landsat для внутренних водных объектов достигает 0,3 °C; мы полагаем, что данные наших исследований, в которых сравнивается температура в различных пикселях одной сцены, имеют сопоставимую погрешность.

Для аналитического моделирования было использовано уравнение теплопроводности. Для второй, третьей и четвёртой контрольной точки выполнен расчёт температурного режима. Начальные данные для расчётов в первой точке определяются эксплуатацией ГЭС либо данными ДЗЗ.

Морфометрические данные, необходимые для решения уравнения теплопроводности (поперечное сечение S и ширина B реки), в пунктах контроля 1–4 были получены по детальным спутниковым данным (спутник QuickBird с пространственным разрешением 0,6 м) и цифровой 3D-модели рельефа дна (батиметрии), сформированной на основе карты-лоции Енисея.

Результаты

Аналитическое моделирование гидротермического режима

Вид течения реки определяется числом Рейнольдса Re. Для условий: удельная плотность воды 10^3 кг/м^3, вязкость воды $1{,}79\cdot10^{-3}$ кг·м$^{-1}$·с$^{-1}$, скорость течения реки 1,5 м/с, гидравлический радиус 4 м — $\mathrm{Re} = 3{,}4\cdot10^6$. При $\mathrm{Re} > 2000$ поток становится турбулентным, что приводит к перемешиванию текущих слоёв воды и выравниванию её температуры в поперечном сечении. Экспериментальные данные (Космаков, 2001) подтверждают это для Енисея. Тогда гидротермический режим реки можно описать уравнением теплопроводности Фурье (Белолипецкий и др., 1993; Shaparev, 2019):

$$\frac{\partial T_w(x,t)}{\partial t} = -V(x,t)\frac{\partial T_w(x,t)}{\partial x} + \frac{D}{\rho c}\cdot\frac{\partial^2 T_w(x,t)}{\partial x^2} + \frac{W(t)}{\rho c}\cdot\frac{B(x)}{S(x)}. \quad (1)$$

Первый член в правой части уравнения описывает перенос тепла за счёт течения реки, второй определяется теплопроводностью воды, а третий описывает энергообмен воды с окружающей средой. Здесь $T_w(x, t)$ — температура воды; t — время; x — расстояние вдоль реки от плотины; D — коэффициент теплопроводности в направлении течения; c — удельная теплоёмкость воды; ρ — удельная плотность воды. Средняя по сечению реки скорость течения $V(x, t) = Q/S(x)$, где Q — расход воды из плотины, $S(x)$ и $B(x)$ — площадь поперечного сечения и ширина реки; $W(t)$ — мощность энергообмена воды с окружающей средой, которая в нашем случае равна (Шапарев, Шокин, 2018; Shaparev, 2019):

$$W(t) = W_s + W_{ss} + W_a - W_w + W_c - W_e.$$

Здесь W_s и W_{ss} — прямая и рассеянная солнечная радиация, поглощаемая водой; W_a — поглощаемая водой тепловая инфракрасная радиация атмосферы; W_w — тепловая инфракрасная радиация, поступающая с поверхности воды в атмосферу; W_c — конвективный теплообмен воды с атмосферой; W_e — затраты энергии на испарение воды.

Так как скорость течения реки около 1,5 м/с, теплопроводностью воды в уравнении (1) можно пренебречь. Тогда переходя в систему координат, движущуюся со скоростью $V(x)$, уравнение (1) перепишется в виде:

$$\frac{\partial T_w(t)}{\partial t} = \frac{W(t)}{\rho c}\cdot\frac{B(x(t))}{S(x(t))}.$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$T_w(t) = \frac{1}{\rho c}\int_{t_0}^{t}\frac{B(x(t))}{S(x(t))}W(t)\,\mathrm{d}t + T_w(0,t_0), \quad x(t) = Q\int_{t_0}^{t}\frac{\mathrm{d}t}{S(x(t))},$$

где $T_w(0, t_0)$ — температура воды при выходе из плотины в момент времени t_0. Расход воды Q и температура воды $T_w(0, t_0)$ задаются режимом эксплуатации ГЭС. Отношение S/B определяет среднюю глубину реки.

В *табл. 1* представлены морфометрические и гидрофизические характеристики в створах реки, где $Q = 2100$ м^3/с.

Таблица 1. Морфометрические и гидрофизические характеристики в створах реки

Номер пункта контроля	1	2	3	4
Расстояние от плотины до створа x, км	2	40	77	124
Ширина створа B, м	520	830	580	450
Площадь сечения створа S, м^2	1834	2254	2452	2513
Скорость течения реки в створе $V(x)$, км/ч	5,7	4,6	4,3	3,7
Время течения между соседними створами Δt_i, ч	–	7,6	9,5	11,9

На первом этапе исследований было выполнено сравнение температуры воды на гидропостах и полученной в результате аналитического моделирования для 08:00 и 20:00, 3 июля 2016 г. Начальная точка расчётов соответствует $T_w(0, t_0 - t_1)$, где t_0 — время измерения на гидропосте; t_1 — время течения воды от плотины до точек расчёта (2, 3, 4) (*табл. 1*). Доверительный интервал для измерений на гидропосте составляет ±0,1 °C. Результаты расчётов (*рис. 2*, см. с. 351) показывают, что аналитическое моделирование хорошо описывает гидротермический режим.

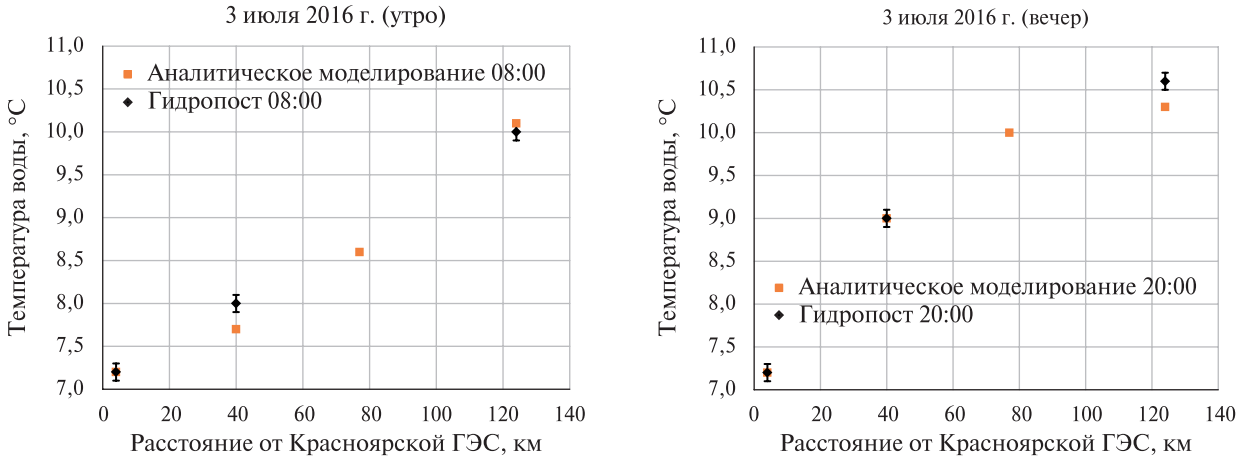

Рис. 2. Температура воды, определяемая аналитическим моделированием и измеренная на гидропостах

Определение температуры воды методами дистанционного зондирования и аналитического моделирования

После загрузки данных L2SP на интересующую дату исследования и проверки на отсутствие облачности определяется температура поверхности. Для этого сначала необходимо провести вычисление яркости L (в Вт·м$^{-2}$·ср$^{-1}$·мкм$^{-1}$), поступающей на спутник, которая определяется выражением:

$$L = \frac{L_{th} - L_{uw} - (1-\varepsilon)L_{dw}\tau}{\tau},$$

где коэффициент излучения воды ε = 0,985 (Parastatidis et al., 2017). Далее определяем яркостную температуру T_B (в K), которая равна:

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L}+1\right)},$$

где K_2 (в K) и K_1 (в Вт·м$^{-2}$·ср$^{-1}$·мкм$^{-1}$) — константы теплового преобразования Landsat-8/-9, которые доступны в файле метаданных (*.MTL). Последним этапом становится вычисление температуры поверхности воды T_w (в °C):

$$T_w = \frac{T_B}{1+\left(\frac{\lambda T_B}{c_2}\ln\varepsilon\right)} - 273{,}15,$$

где длина волны λ = 11,3 мкм (значение для 10-го канала Landsat-8/-9); c_2 — вторая радиационная постоянная, $c_2 = hc/k = 1{,}4388\cdot10^{-2}$ м·K = 14 388 мкм·K.

Убеждённые в правильности величин, полученных ранее в результате аналитического моделирования, мы провели расчёты для контрольных пунктов на 11:52 (местное время пролёта спутника над Красноярском) 3 июля 2016, 5 июля 2022, 26 июля 2024, 24 июня 2024 г.

В качестве исходных данных были использованы атмосферные параметры из набора данных L2SP, значение L_{th} получено из слоя с названием *_St_trad, L_{uw} соответствует значение слоя *_ St_urad, а L_{dw} — *_St_drad, τ — St_atran. Результаты вычисления температуры воды T_w для 3 июля 2016 г. представлены в *табл. 2.*

На *рис. 3* (см. с. 352) приведены результаты дистанционного зондирования и аналитического моделирования, где в качестве исходной точки применены данные ДЗЗ Landsat на расстоянии 2 км от плотины Красноярской ГЭС. На *рис. 3а* рассмотрена дата 3 июля 2016 г.,

где $Q = 2100$ м^3/с. На *рис. 3б* $Q = 2100$ м^3/с, на *рис. 3в* $Q = 2800$ м^3/с, на *рис. 3г* $Q = 3100$ м^3/с. Доверительный интервал для данных дистанционного зондирования равен ±0,3 °С. Согласно данным, представленным на *рис. 3*, температура воды, определяемая методом ДЗЗ и аналитическим моделированием, имеет близкие значения.

Таблица 2. Результаты расчёта по спутниковым данным и с применением аналитического моделирования для 03.06.2016

Пункт	L_{uw}	L_{th}	L_{dw}	τ	L	T_B	Landsat T_w	Расчёт T_w
	Вт·м$^{-2}$·ср$^{-1}$·мкм$^{-1}$				Вт·м$^{-2}$·ср$^{-1}$·мкм$^{-1}$	K	°C	
1	2,3	7,1	1,1	0,67	7,06	280,6	7,2	7,2
2					7,12	281,1	8,0	7,9
3		7,2			7,17	281,6	8,4	8,3
4					7,25	282,2	9,9	9,8

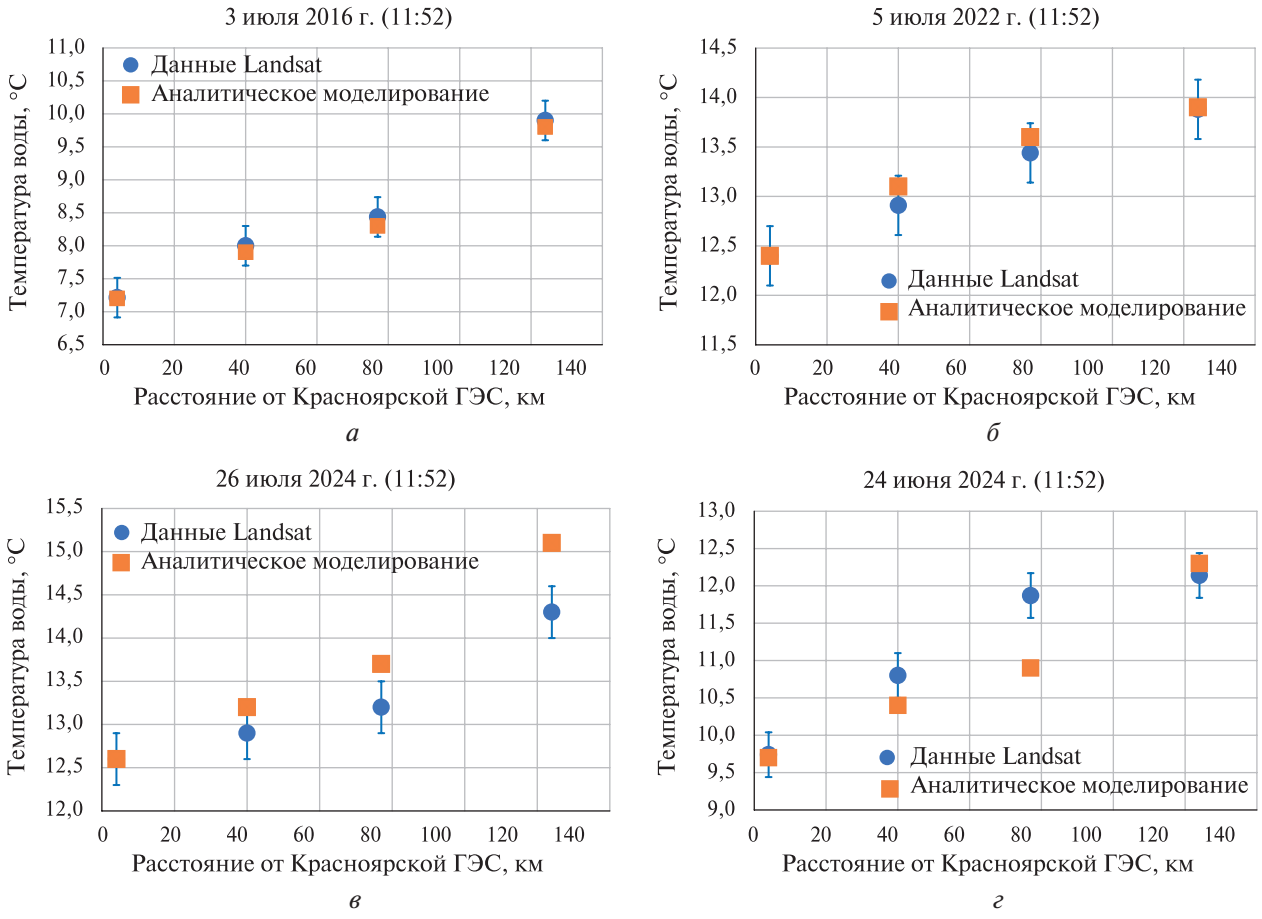

Рис. 3. Температура воды, определяемая методом ДЗЗ и аналитическим моделированием: *а*, *б* — $Q = 2100$ м^3/с; *в* — $Q = 2800$ м^3/с; *г* — $Q = 3100$ м^3/с

Заключение

Зарегулирование стока реки Енисей плотиной Красноярской ГЭС привело к значительным изменениям гидрологического и термического режимов, что требует внедрения современных методов контроля температуры воды, преодолевающих ограничения традиционной системы мониторинга на гидропостах. Проведённое исследование посвящено разработке комплексного подхода к мониторингу температурного режима реки в нижнем бьефе Красно-

ярской ГЭС на основе методов дистанционного зондирования Земли и аналитического моделирования.

Полученные результаты показали эффективность интеграции методов ДЗЗ и аналитического моделирования. Использование спутниковых данных Landsat-8/-9 Collection 2 Level 2 Science Product (L2SP) с атмосферной коррекцией позволило получить температуру поверхности воды LST с погрешностью, сопоставимой с наземными измерениями. Аналитическая модель гидротермического режима, основанная на уравнении теплопроводности с учётом солнечной и тепловой радиации, конвекции и испарения, продемонстрировала высокую согласованность с данными гидропостов и ДЗЗ.

Спутниковые данные обеспечивают пространственную детализацию температурного поля, недостижимую при точечных измерениях на гидропостах. В свою очередь аналитическое моделирование позволяет интерполировать температурные данные между редкими гидропостами и восполнять пробелы в спутниковых наблюдениях, вызванные отсутствием безоблачных сцен и ограниченной частотой съёмки. Совместное применение указанных методов устраняет их индивидуальные недостатки — низкое пространственное разрешение ДЗЗ (100 м в тепловом диапазоне) и ограниченный охват гидропостов.

Предложенный комплексный подход, сочетающий дистанционное зондирование и аналитическое моделирование, существенно расширяет возможности мониторинга температурного режима реки Енисей. Его внедрение позволит повысить точность и оперативность контроля за состоянием водных ресурсов, что необходимо для устойчивого управления речным стоком, минимизации экологических рисков и поддержания баланса между энергетическими и природоохранными интересами региона.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию модели для различных сценариев эксплуатации ГЭС, а также на разработку геоинформационной системы, объединяющей спутниковые данные, гидрологические измерения и прогностические расчёты.

Литература

1. *Белолипецкий В. М.*, *Генова С. Н.*, *Туговиков В. Б.*, *Шокин Ю. И.* Численное моделирование задач гидроледотермики водотоков. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1993. 138 с.
2. *Космаков И. В.* Термический и ледовый режим в верхних и нижних бьефах высоконапорных гидроэлектростанций на Енисее. Красноярск: Кларетианум, 2001. 143 с.
3. *Ложкин Д. М.*, *Шевченко Г. В.* Сравнительный анализ температуры поверхности Охотского моря по данным спутниковых наблюдений и реанализа ERA5 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 183–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-183-192.
4. *Пармузин Е. И.*, *Лёзина Н. Р.*, *Агошков В. И.* Исследование влияния ассимиляции мгновенных данных наблюдений со спутников на воспроизведение температуры поверхности моря в модели динамики Чёрного и Азовского морей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 2. С. 61–69. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-61-69.
5. *Рис У. Г.* Основы дистанционного зондирования. М.: Техносфера, 2006. 338 с.
6. *Степаненко В. М.*, *Репина И. А.*, *Медведев А. И.*, *Романенко В. А.* Воспроизведение моделью LAKE температуры поверхности крупнейших озёр Земли: система автоматической калибровки по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 267–283. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-267-283.
7. *Шапарев Н. Я.*, *Андрианова А. В.* Показатели устойчивого водопользования р. Енисей // География и природные ресурсы. 2018. № 4. С. 47–56. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-4(47-56).
8. *Шапарев Н. Я.*, *Шокин Ю. И.* Моделирование летнего гидротермического режима в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // Вычисл. технологии. 2018. Т. 23. № 6. С. 107–114. DOI: 10.25743/ICT.2018.23.6.0010.
9. *Caissie D.* The thermal regime of rivers: A review // Freshwater Biology. 2006. V. 51. P. 1389–1406. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x.
10. *Dingman S. L.* Physical hydrology. 3rd ed. Long Grove: Waveland Press, 2015. 670 p.
11. *Handcock R. N.*, *Gillespie A. R.*, *Cherkauer K. A. et al.* Accuracy and uncertainty of thermal-infrared remote sensing of stream temperatures at multiple spatial scales // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 100. P. 427–440. DOI: 10.1016/j.rse.2005.07.007.

12. *Jimenez-Munoz J. C.*, *Cristobal J.*, *Sobrino J. A. et al.* Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2009. V. 47. Iss. 1. P. 339–349. DOI: 10.1109/TGRS.2008.2007125.
13. *Kirner D.*, *Laska K.*, *Stachon Z.* Assessment and validation of Land Surface Temperature retrieval algorithms using Landsat 8 TIRS data in Antarctic ice-free areas // Polar Science. 2024. V. 42. Article 101127. DOI: 10.1016/j.polar.2024.101127.
14. *Li Z.-L.*, *Tang B.-H.*, *Wu H. et al.* Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 131. P. 14–37. DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.008.
15. *Ling F.*, *Foody G. M.*, *Du H. et al.* Monitoring thermal pollution in rivers downstream of dams with Landsat ETM+ thermal infrared images // Remote Sensing. 2017. V. 9. Iss. 11. Article 1175. DOI: 10.3390/rs9111175.
16. *Lyapustin A.*, *Wang Y.*, *Korkin S.*, *Huang D.* MODIS Collection 6 MAIAC algorithm // Atmospheric Measurement Techniques. 2018. V. 11. Iss. 10. P. 5741–5765. DOI: 10.5194/amt-11-5741-2018.
17. *Malakar N. K.*, *Hulley G. C.*, *Hook S. J. et al.* An operational land surface temperature Product for Landsat thermal data: Methodology and validation // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2018. V. 56. Iss. 10. P. 5717–5735. DOI: 10.1109/TGRS.2018.2824828.
18. *Matuzko A. K.*, *Yakubailik O. E.* Monitoring of land surface temperature in Krasnoyarsk and its suburban area based on Landsat 8 satellite data // J. Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2018. V. 11. No. 8. P. 934–945. DOI: 10.17516/1999-494X-0115.
19. *Montanaro M.*, *Levy R.*, *Markham B.* On-orbit radiometric performance of the Landsat 8 Thermal Infrared Sensor // Remote Sensing. 2014. V. 6. Iss. 12. P. 11753–11769. DOI: 10.3390/rs61211753.
20. *Parastatidis D.*, *Mitraka Z.*, *Chrysoulakis N.*, *Abrams M.* Online global land surface temperature estimation from Landsat // Remote Sensing. 2017. V. 9. Iss. 12. Article 1208. DOI: 10.3390/rs9121208.
21. *Sekertekin A.* Validation of physical radiative transfer equation-based land surface temperature using Landsat 8 satellite imagery and SURFRAD in-situ measurements // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2019. V. 196. Article 105161. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.105161.
22. *Shaparev N.* Modelling summer water temperature on the Yenisei River // Thermal Science. 2019. V. 23. P. 607–614.
23. *Shaparev N.*, *Shokin Y.*, *Yakubailik O.* Modelling and remote sensing of water temperature of the Yenisei River // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. V. 211. Article 012022.
24. *Simon R. N.*, *Tormos T.*, *Danis P.-A.* Retrieving water surface temperature from archive Landsat thermal infrared data: Application of the mono-channel atmospheric correction algorithm over two freshwater reservoirs // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2014. V. 30. P. 247–250. DOI: 10.1016/j.jag.2014.01.005.
25. *Sinokrot B. A.*, *Stefan H. G.* Stream temperature dynamics: Measurements and modeling // Water Resources Research. 1993. V. 29. Iss. 7. P. 2299–2312.
26. *Vanhellemont Q.* Automated water surface temperature retrieval from Landsat 8/TIRS // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 237. Article 111518. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111518.
27. *Wang F.*, *Qin Z.*, *Song C. et al.* An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 Thermal Infrared Sensor data // Remote Sensing. 2015. V. 7. Iss. 4. P. 4268–4289. DOI: 10.3390/rs70404268.
28. *Wawrzyniak V.*, *Piégay H.*, *Poirel A.* Longitudinal and temporal thermal patterns of the French Rhône River using Landsat ETM+ thermal infrared images // Aquatic Sciences. 2012. V. 74. P. 405–414.
29. *Webb B. W.*, *Hannah D. M.*, *Moore R. D.*, *Brown L. E.*, *Nobilis F.* Recent advances in stream and river temperature research // Hydrological Processes. 2008. V. 22. Iss. 7. P. 902–918.
30. *Yang D.*, *Liu B.*, *Ye B.* Stream temperature changes over Lena River basin in Siberia // Geophysical Research Letters. 2005. V. 32. Iss. 5. Article L05401. DOI: 10.1029/2004GL021568.
31. *Yu X.*, *Guo X.*, *Wu Z.* Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS — Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method // Remote Sensing. 2014. V. 6. Iss. 10. P. 9829–9852. DOI: 10.3390/rs6109829.

Remote sensing and analytical modeling of temperature regime of the Yenisei River in the lower pool of Krasnoyarsk HPP

A. K. Matuzko [1], N. Ya. Shaparev [1], O. E. Yakubailik [2]

[1] *Institute of Computational Modelling SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia*
E-mail: akmatuzko@icm.krasn.ru
[2] *Krasnoyarsk Science Center SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia*
E-mail: oleg@icm.krasn.ru

Regulation of the Yenisei River flow by the Krasnoyarsk Hydroelectric Power Plant has led to significant changes in the hydrothermal regime in the lower pool. The existing water temperature monitoring system based on discrete measurements at gauging stations does not provide sufficient spatiotemporal detailing to address current tasks of socio-economic development of the Yenisei basin and the Arctic territories of the Krasnoyarsk Krai. The paper proposes an integrated approach combining remote sensing and analytical modeling methods to assess the river temperature regime. The remote sensing data were obtained from thermal infrared surveys of Landsat-8/-9 (Collection 2 Level 2 Science Product) that provide high accuracy data due to the inclusion of atmospheric parameters. The analytical modeling of the hydrothermal regime was performed based on solution of the heat conduction equation, taking into account solar and thermal infrared radiation, convection and evaporation. Morphometric characteristics of the riverbed were obtained from high-resolution QuickBird satellite images. The results showed a high degree of consistency between the calculated temperatures and the data from the hydrographic posts, as well as the results of water temperature calculations based on Landsat satellite data. The proposed approach allows for a significant improvement in the spatial and temporal resolution of river temperature monitoring. However, a number of limitations related to the frequency of satellite imaging, cloudiness, and spatial resolution of Landsat thermal channels were identified.

Keywords: water temperature, Yenisei, Landsat-8/-9, remote sensing, hydroposts, analytical modeling

Accepted: 03.09.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-346-356

References

1. Belolipetsky V. M., Genova S. N., Tugovikov V. B., Shokin Yu. I., *Chislennoe modelirovanie zadach gidroledotermiki vodotokov* (Numerical modeling of problems of hydro-ice thermals of watercourses), Novosibirsk: Izd. SO RAN, 1993, 138 p. (in Russian).
2. Kosmakov I. V., *Termicheskii i ledovyi rezhim v verkhnikh i nizhnikh b'efakh vysokonapornykh gidroehlektrostantsii na Enisee* (Thermal and ice regime in the upper and lower pools of high-pressure hydroelectric power stations on the Yenisei), Krasnoyarsk: Claretianum, 2001, 143 p. (in Russian).
3. Lozhkin D. M., Shevchenko G. V., Comparative analysis of Okhotsk Sea surface temperature from satellite observations and ERA5 reanalysis, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 2, pp. 183–192 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-183-192.
4. Parmuzin E. I., Lezina N. R., Agoshkov V. I., Investigation of the effect of assimilation of instantaneous satellite data on the reproduction of sea surface temperature in the Black and Azov Seas dynamics model, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 2, pp. 61–69 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-61-69.
5. Rice W. G., *Osnovy distantsionnogo zondirovaniya* (Fundamentals of Remote Sensing), Moscow*:* Tekhnosfera, 2006, 338 p. (in Russian).
6. Stepanenko V. M., Repina I. A., Medvedev A. I., Romanenko V. A., Reproduction of the largest Earth lakes surface temperature by the LAKE model: Automatic calibration system based on MODIS data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 6, pp. 267–283 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-267-283.
7. Shaparev N. Ya., Andrianova A. V., Indicators of sustainable water use of the Yenisei River, *Geography and natural resource*s, 2018, No. 4, pp. 47–56 (in Russian), DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-4(47-56).

8. Shaparev N. Ya., Shokin Yu. I., Modeling of summertime hydrothermal regime in the downstream pool of Krasnoyarsk hydroelectric power station, *Computational technologies*, 2018, V. 23, No. 6, pp. 107–114 (in Russian), DOI: 10.25743/ICT.2018.23.6.0010.
9. Caissie D., The thermal regime of rivers: A review, *Freshwater Biology*, 2006, V. 51, pp. 1389–1406, DOI: 10.1111/j.1365-2427.2006.01615.x.
10. Dingman S. L., *Physical Hydrology*, 3rd ed., Long Grove: Waveland Press, 2015, 670 p.
11. Handcock R. N., Gillespie A. R., Cherkauer K. A. et al., Accuracy and uncertainty of thermal-infrared remote sensing of stream temperatures at multiple spatial scales, *Remote Sensing of Environment*, 2006, V. 100, pp. 427–440, DOI: 10.1016/j.rse.2006.01.007.
12. Jimenez-Munoz J. C., Cristobal J., Sobrino J. A. et al., Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2009, V. 47, Iss. 1, pp. 339–349, DOI: 10.1109/TGRS.2008.2007125.
13. Kirner D., Laska K., Stachon Z., Assessment and validation of Land Surface Temperature retrieval algorithms using Landsat 8 TIRS data in Antarctic ice-free areas, *Polar Science*, 2024, V. 42, Article 101127, DOI: 10.1016/j.polar.2024.101127.
14. Li Z.-L., Tang B.-H., Wu H. et al., Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives, *Remote Sensing of Environment*, 2013, V. 131, pp. 14–37, DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.008.
15. Ling F., Foody G. M., Du H. et al., Monitoring thermal pollution in rivers downstream of dams with Landsat ETM+ thermal infrared images, *Remote Sensing*, 2017, V. 9, Iss. 11, Article 1175, DOI: 10.3390/rs9111175.
16. Lyapustin A., Wang Y., Korkin S., Huang D., MODIS Collection 6 MAIAC algorithm, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, V. 11, Iss. 10, pp. 5741–5765, DOI: 10.5194/amt-11-5741-2018.
17. Malakar N. K., Hulley G. C., Hook S. J. et al., An operational land surface temperature product for Landsat thermal data: Methodology and validation, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2018, V. 56, Iss. 10, pp. 5717–5735, DOI: 10.1109/TGRS.2018.2824828.
18. Matuzko A. K., Yakubailik O. E., Monitoring of land surface temperature in Krasnoyarsk and its suburban area based on Landsat 8 satellite data, *J. Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, 2018, V. 11, No. 8, pp. 934–945, DOI: 10.17516/1999-494X-0115.
19. Montanaro M., Levy R., Markham B., On-orbit radiometric performance of the Landsat 8 Thermal Infrared Sensor, *Remote Sensing*, 2014, V. 6, Iss. 12, pp. 11753–11769, DOI: 10.3390/rs61211753.
20. Parastatidis D., Mitraka Z., Chrysoulakis N., Abrams M., Online global land surface temperature estimation from Landsat, *Remote Sensing*, 2017, V. 9, Iss. 12, Article 1208, DOI: 10.3390/rs9121208.
21. Sekertekin A., Validation of physical radiative transfer equation-based land surface temperature using Landsat 8 satellite imagery and SURFRAD in-situ measurements, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2019, V. 196, Article 105161, DOI: 10.1016/j.jastp.2019.105161.
22. Shaparev N., Modelling summer water temperature on the Yenisei River, *Thermal Science*, 2019, V. 23, pp. 607–614.
23. Shaparev N., Shokin Y., Yakubailik O., Modelling and remote sensing of water temperature of the Yenisei River, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2018, V. 211, Article 012022.
24. Simon R. N., Tormos T., Danis P.-A., Retrieving water surface temperature from archive Landsat thermal infrared data: Application of the mono-channel atmospheric correction algorithm over two freshwater reservoirs, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, V. 30, pp. 247–250, DOI: 10.1016/j.jag.2014.01.005.
25. Sinokrot B. A., Stefan H. G., Stream temperature dynamics: Measurements and modeling, *Water Resources Research*, 1993, V. 29, Iss. 7, pp. 2299–2312.
26. Vanhellemont Q., Automated water surface temperature retrieval from Landsat 8/TIRS, *Remote Sensing of Environment*, 2020, V. 237, Article 111518, DOI: 10.1016/j.rse.2019.111518.
27. Wang F., Qin Z., Song C. et al., An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 Thermal Infrared Sensor data, *Remote Sensing*, 2015, V. 7, Iss. 4, pp. 4268–4289, DOI: 10.3390/rs70404268.
28. Wawrzyniak V., Piégay H., Poirel A., Longitudinal and temporal thermal patterns of the French Rhône River using Landsat ETM+ thermal infrared images, *Aquatic Sciences*, 2012, V. 74, pp. 405–414.
29. Webb B. W., Hannah D. M., Moore R. D., Brown L. E., Nobilis F., Recent advances in stream and river temperature research, *Hydrological Processes*, 2008, V. 22, Iss. 7, pp. 902–918.
30. Yang D., Liu B., Ye B., Stream temperature changes over Lena River basin in Siberia, *Geophysical Research Letters*, 2005, V. 32, Iss. 5, Article L05401, DOI: 10.1029/2004GL021568.
31. Yu X., Guo X., Wu Z., Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS — Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method, *Remote Sensing*, 2014, V. 6, Iss. 10, pp. 9829–9852, DOI: 10.3390/rs6109829.