# Термический режим поверхности водоема-охладителя Березовской ГРЭС-1 по данным MODIS

## А.С. Савельев, О.Г. Морозова, Н.С. Веселкова

Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Россия E-mail: andrey.s.saveliev@gmail.com

Температура поверхности водоема является одним из ведущих факторов эвтрофикации. Сброс отепленной воды от тепловых электростанций является причиной повышения температуры воды в водоемах-охладителях, что может привести к негативным последствиям для экосистемы водоемов. Температура воды контролируется наземными измерениями в рамках мониторинга качества воды. Использование дистанционных методов контроля позволяет расширить временной ряд наблюдений и улучшить их пространственное разрешение. Работа посвящена изучению термического режима поверхности водоема-охладителя Березовской ГРЭС-1 по данным спектрорадиометра MODIS. Применимость сцен MOD11A2 для построения карт среднемесячных температур и зонирования водоема в крупном масштабе показана путем их наложения на сцены Landsat (TIRS, ETM+), снятые в тот же день. Для однородных поверхностей наблюдается слабая изменчивость температуры на участке водоема, соответствующем пикселю MODIS. Обработка и анализ данных выполнялись при помощи свободной ГИС Quantum GIS. На основе сцен MODIS/Terra Level-3 MOD11A2 за период 2000-2016 гг. построены временные ряды температуры поверхности в различных точках водоема, по которым определены параметры термического режима: минимальная и максимальная температура поверхности, средняя температура и ее стандартное отклонение, средняя продолжительность сезона с температурой выше 20°С, средние даты начала периода прямой и обратной стратификации. Анализ полученных временных рядов для разных точек выявил пространственные вариации термического режима водоема. Построены карты изолиний среднемесячной температуры поверхности воды, отражающие тепловое воздействие электростанции на водоем. В зимний период влияние теплового сброса БГРЭС-1 на температуру поверхностного слоя значительно сильнее, чем в летний. Выполнено зонирование водоема-охладителя методом агломеративной иерархической кластеризации и вычислены среднемесячные температуры для полученных зон. Циркуляционный поток нагретой воды из сбросного канала к водозабору станции проходит в небольшой по площади зоне, расположенной возле станции, что снижает эффективность охлаждения воды и приводит к риску эвтрофикации водоема.

Ключевые слова: Березовская ГРЭС-1, эвтрофикация, водоем-охладитель, температура поверхности, стратификация, MODIS, продукт MOD11A2, карта, изолинии, зонирование, кластеризация

Одобрена к печати: 07.07.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-177-189

## Введение

Эвтрофикация водоемов-охладителей является одной из важных экологических проблем при эксплуатации тепловых и атомных электростанций. На процессы биологического продуцирования органического вещества в природно-техногенных экосистемах водоемов-охладителей значительное влияние оказывает температура воды. Тепловой сброс электростанций смещает естественный температурный баланс водоема в сторону увеличения среднегодовой температуры, что приводит к дисбалансу между процессами продуцирования и деструкции (Щур, 2009). Для развития цианобактерий и хлорофитов благоприятна температура от +20 °C до +35 °C; температура +29 °C является оптимальной для их роста (Lürling et al., 2013).

Естественный термический режим водоемов определяется его географическим положением, климатом, рельефом дна и глубиной, направлением циркуляционных потоков водных масс. Режим стратификации пресноводных водоемов зависит от температуры поверхностного слоя. В период весеннего и летнего нагревания имеет место прямая стратификация, когда температура воды убывает с глубиной. Осенью и зимой, когда поверхностный слой охлаждается до температуры +4 °C и имеет максимальную плотность воды, нарушается устойчивость стратификации, возрастает интенсивность вертикальных конвекционных потоков — идет обратная стратификация (Горбунов, 2007).

В водоем-охладитель сбрасывается большое количество тепла, представляющего собой значительную часть энергии ископаемого топлива. Повышение температуры воды, охлаждающей поверхности нагрева теплоагрегатов, происходит на 10-20 °C, а в открытом водосбросном канале — на 10-12 °C. Основная отдача тепла происходит в водоеме, где вода охлаждается за счет испарения и конвекции. Принятые для водоемов-охладителей нормативы, объединяющие расположенные в различных физико-географических условиях водоемы разного трофического уровня, ландшафтно-географического положения и хозяйственного назначения, предусматривают недопустимость превышения температуры вод в водоеме в зимнее время на 5 °C, а в летнее — на 3 °C выше естественной максимальной температуры (Топачевский, Пидгайко, 1971).

Березовская ГРЭС-1, находящаяся в Шарыповском районе Красноярского края, введена в эксплуатацию в 1986 г. Водоем-охладитель сооружен зарегулированием стока реки Береш, принадлежащей бассейну Верхнего Чулыма, в районе впадения в нее рек Базыр и Кадат. Экспедиционные исследования и мониторинг качества воды водоема-охладителя в восьми контрольных точках проводились с начала заполнения водоема по 1996 г. (Морозова, Пен, Репях, 2001; Морозова, Пен, Фоменко, 2011). Использование дистанционных методов для контроля температуры поверхности водоема позволяет расширить временной ряд наблюдений и улучшить их пространственное разрешение.

Для изучения пространственных и временных вариаций температуры поверхности Земли широко используются данные спектрорадиометра MODIS Terra, Aqua (Афонин, 2012; Буканова, Стонт, Гущин, 2015; Kilpatrick et al., 2015). Архивный центр NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center предоставляет обработанные данные о температуре и коэффициенте излучения поверхности Земли в виде серии продуктов MOD11, получаемых при помощи физических и регрессионных моделей.

Цель работы заключается в оценке параметров термического режима поверхности водоема-охладителя БГРЭС-1 по данным Terra/MODIS, анализе пространственных вариаций среднемесячной температуры и зонировании водоема по особенностям термического режима для дальнейшей разработки научно-обоснованных рекомендаций для БГРЭС-1 и природоохранных служб, обеспечивающих сохранение природных механизмов самоочищения водной экосистемы и оптимального функционирования природно-техногенного энергетического комплекса.

## Используемые данные тепловой инфракрасной съемки

На изучаемый временной интервал 2000–2016 гг. доступны данные съемки в тепловом инфракрасном диапазоне от нескольких систем дистанционного зондирования. Лучшим пространственным разрешением среди них обладают системы Landsat 5 TM (120 м), Landsat 7 ETM+ (60 м), Landsat 8 TIRS (100 м), Terra ASTER (90 м), позволяющие с высокой детальностью выявлять пространственные вариации температуры поверхности водоема. При таком уровне пространственного разрешения хорошо выделяется циркуляционный поток охлаждаемой воды, а также кромка льда зимой (*puc. 1*). При этом временное разрешение Landsat и Terra ASTER мало по сравнению с ежедневными данными MODIS. Метеорологические особенности юга Красноярского края таковы, что на сценах Landsat 8 TIRS в среднем за год можно набрать лишь 15 свободных от облаков изображений объекта. Даты съемки этих сцен распределены в течение года неравномерно.



Puc. 1. Температура поверхности водоема по данным Landsat 8 TIRS (канал 10) и MOD11A2 Terra MODIS

Одиночное изображение Landsat 8 отражает текущую температуру поверхности водоема, которая зависит от многих случайных факторов. Станция осуществляет сброс отепленной воды неравномерно во времени. Нерегулярный тепловой сброс приводит к значительным временным вариациям температуры поверхности водоема-охладителя, что при малом количестве имеющихся сцен Landsat 8 за год ведет к высокой стандартной ошибке при вычислении среднемесячной температуры.

В качестве исходных данных для характеристики термического режима поверхности водоема-охладителя БГРЭС-1 использовались изображения MODIS/Terra Level-3 MOD11A2 версии 06, которые получаются на основе ежедневных данных MOD11A1 о температуре земной поверхности как среднее значение температуры за восемь дней, исключая дни, когда поверхность закрыта облаками. Вариации температуры поверхности в течение года описываются 46 восьмидневными наборами данных MOD11A2, включающими информацию о дневной и ночной температуре поверхности с пространственным разрешением около 1 км. Среднее время пролета спутника над водоемом днем — в 11 часов, а ночью — в 22 часа по местному солнечному времени.

Сцены продукта MOD11A2 в синусоидальной проекции имеют размер 1200×1200 пикселей. При переводе изображений из синусоидальной проекции в универсальную поперечную проекцию Mepкatopa WGS-84/UTM сетка пикселей приобретает вид вытянутых четырехугольников с синусоидальными сторонами (*puc. 1*). Местоположения пикселей с равными координатами двух изображений продукта MOD11A2 совпадают на карте, что позволяет выполнять непосредственно над этими растрами различные математические операции.

Водоем-охладитель БГРЭС-1 имеет небольшую площадь поверхности (около 28,6 км<sup>2</sup>) и изображается в ГИС в крупном масштабе, в котором данные MODIS из-за низкого пространственного разрешения уже не выглядят как непрерывные изображения (*puc. 1*). Пиксели соответствуют на местности участкам водоема площадью около 1 км<sup>2</sup>, внутри которых могут находиться поверхности с разными физическими свойствами: вода в различных фазовых состояниях, заросли плавающих водорослей, острова всплывшего после затопления водохранилища торфа, а также может попадать суша.

Для статистического анализа температуры поверхности водоема выбраны пиксели, полностью лежащие на поверхности водоема (на *рис. 1* — пиксели 2, 3, 5–8, 11–15, 18–22, 25), а также пиксели, включающие сушу, но лежащие большей частью (93% и более) на поверхности водоема (пиксели 1, 4, 10, 17, 24, 26–28). Пиксели 9, 16 и 23 затрагивают значительную часть суши (до 33% от площади пикселя), но включены в набор данных для анализа по причине интенсивного теплового воздействия на водоем в этом месте.

Для изучения температуры поверхности в разных точках водоема-охладителя за период с марта 2000 г. по декабрь 2016 г., были загружены 776 сцен MOD11A2. Данные MOD11A2 содержат код контроля качества QC, который позволяет отфильтровать при обработке закрытые облаками пиксели и получить оценку точности измерения температуры поверхности. Согласно коду QC в полученных изображениях 46% пикселей имеют среднюю ошибку измерения температуры поверхности менее 1°K, 43% - 1-2°K, а 11% закрыты облаками. Чтобы построить непрерывные временные ряды температуры поверхности, вместо отсутствующих значений закрытых облаками пикселей взяты результаты линейной интерполяции температуры по ближайшим датам. Значения температур переведены в шкалу Цельсия.

### Методы обработки данных

Обработка данных MOD11A2 осуществлялась при помощи Quantum GIS с установленным модулем Semi-Automatic Classification Plugin (Condego, 2016), а также утилит библиотеки GDAL. Для автоматизированной обработки большого количества исходных изображений использовались скрипты на языке Python и встроенные в Quantum GIS библиотеки численных методов numpy и научных вычислений scipy.

Полученные сцены дневных температур поверхности MOD11A2 обрезаны по координатам водоема, а из получившихся изображений создан набор пространственно-совмещенных матриц  $M_k = \{m_{k_{i,j}}, i=1...13, j=1...10\}, k=1...776$ . Развертка этих матриц дает множество векторов, формирующих строки матрицы  $A = \{a_{kl}, k=1...776, l=1...130\}$ , в которой строки соответствуют различным точкам на поверхности водоема, а столбцы — временным рядам температуры поверхности для различных точек (*puc. 2*). Естественный суточный ход температуры для водной поверхности выражается долями градусов Цельсия,

на *рис. 2* разность в 5–7 °С между дневными и ночными температурами отражает воздействие сброса отепленной воды от БГРЭС-1 на температуру поверхности водоема.



Рис. 2. Фрагмент временного ряда дневной и ночной температуры поверхности водоема-охладителя БГРЭС-1 около сбросного канала (точка 15) за 2016 г.

Каждому столбцу матрицы A соответствует элемент разрешения MOD11A2. Наложение в Quantum GIS границы водоема на растровую сетку данных MODIS позволяет выделить пиксели, относящиеся к поверхности водоема. Даты в полученных временных рядах имеют формат YYYY–DOY, где YYYY показывает год, а DOY — номер дня в году, когда выполнена съемка. По номеру дня в году определяется месяц съемки, что позволяет вычислить среднемесячную температуру поверхности водоема путем группировки строк матрицы A по месяцам. Так получены 12 растров размера  $10 \times 13$ , отражающих пространственное распределение среднемесячных температур, вычислены их стандартные отклонения, определены стандартные ошибки и получены 95%-е доверительные интервалы (*t*-распределение) среднемесячной температуры. Максимальные стандартные ошибки среднего (до 0,75 °C) приходятся на январь, а минимальные (0,24 °C) — на июль.

Карты изотерм среднемесячной температуры поверхности водоема получены аппроксимацией поверхности пространственного распределения температуры кубическими сплайнами. Для этого каждый из 12 растров среднемесячной температуры преобразован в векторный точечный слой центроидов пикселей, на основе которого в Quantum GIS выполнена аппроксимация температуры поверхности и построены векторные линейные слои изотерм среднемесячной температуры. При этом среднеквадратическая ошибка аппроксимации максимальна зимой (1,1 °C в январе) и минимальна летом (0,2 °C в июле).

Зонирование акватории водоема-охладителя по среднемесячной температуре поверхности воды выполнялось путем кластеризации 28 выбранных пикселей на поверхности водоема (*puc. 1*). При помощи различных алгоритмов вычисления расстояний между формируемыми кластерами получены несколько вариантов агломеративной иерархической кластеризации, для каждого из которых определена кофенетическая корреляция. Характер отношений между пикселями наилучшим образом отражает кластеризация, полученная при оценке расстояния между формируемыми кластерами методом взвешенного парного среднего: d(u, v) = (dist(s, v) + dist(t, v))/2, где *s* и *t* — кластеры, объединяемые на следующем уровне иерархии в новый кластер, а *u*, *v* — остальные кластеры. Значение кофенетической корреляции для кластеризации, полученной методом взвешенного парного среднего (9,83.



Рис. 3. Сопоставление данных тепловой инфракрасной съемки Terra MODIS и Landsat

Верификация полей пространственного распределения температуры поверхности водоема, полученных по данным низкого пространственного разрешения MODIS и изображаемых в сильно укрупненном масштабе, проводилась относительно сцен тепловой инфракрасной съемки Landsat (TIRS, ETM+). С этой целью были подобраны пары изображений Terra MODIS и Landsat, полученных в один день при условии полного отсутствия облаков над объектом. После стандартной процедуры обработки и атмосферной коррекции данных Landsat сцены приведены к общему пространственному разрешению, для этого ежедневные дневные изображения MOD11A1 ресэмплированы методом «ближайшего соседа» относительно сетки пикселей изображений Landsat.

Каждому пикселю изображения MODIS соответствует около 900 пикселей Landsat, по которым вычислены средние значения температуры и их стандартные отклонения (STD-DEV). Когда поверхность водоема свободна ото льда, из-за высокой теплоемкости воды пространственные вариации температуры поверхности внутри пикселя MODIS малы: наблюдаются значения STDDEV < 1 °C (*puc. 3*). Зимой для ледяной и снежной поверхностей значения STDDEV несколько выше — до 2 °C. Наибольшие стандартные отклонения наблюдаются в случае, когда пиксель MODIS захватывает различные типы поверхностей (вода/суша, вода/ лед) в приблизительно равных долях.

Приняв значения температуры поверхности, полученные по данным Landsat (TIRS, ETM+), за образцовые значения, в каждом пикселе MOD11A1 вычисляли среднеквадратическую ошибку аппроксимации:

$$RMSE(M_{i,j}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{\substack{p,q \\ L_{p,q} \cap M_{ij}}}^{n} (L_{p,q} - M_{i,j})^{2}},$$

где L — сцена Landsat; M — сцена MOD11A1; n — количество пикселей Landsat, пересекающих пиксель MOD11A1, а суммирование ведется по всем пикселям сцены Landsat, соответствующим данному пикселю MODIS. Карты пространственного распределения стандартных отклонений температуры поверхности и среднеквадратических ошибок, полученных для пикселей MOD11A1 относительно данных более высокого пространственного разрешения Landsat (*puc. 3*), показывают слабую изменчивость температуры внутри пикселя MOD11A1 для однородных поверхностей и приемлемую точность аппроксимации данных Landsat данными MODIS.

## Анализ результатов

На основе временных рядов температуры поверхности, полученных по данным MOD11A2, определены параметры термического режима водоема-охладителя БГРЭС-1 (*табл. 1*). Данные тепловой инфракрасной съемки показывают значительное пространственное разнообразие температурных условий в водоеме, обусловленное тепловым воздействием станции, разделением акватории водоема дамбой на две части, воздействием стока рек Береш, Базыр и Кадат, циркуляционными потоками воды, рельефом дна и глубиной. Вычислена многолетняя среднегодовая температура поверхности в целом по водоему — +4°C. Максимальная температура поверхности зафиксирована в июле и достигает в отдельные годы опасных значений — до +29°C.

Зона	№ точки	Дневная температура поверхности T, °C				Среднее число дней	Начало стратификации	
		$CI_{95\%}(\overline{T})^*$	$\sigma_{_T}$	T <sub>max</sub>	$T_{min}$	<i>B 200y C t &gt;</i> +20 °C	прямой	обратной
Ι	4	6,3±-0,9	12,2	28,3	-29,5	62	3 апреля	26 октября
	8	6,2±-0,8	11,4	26,0	-29,5	53	4 апреля	28 октября
	9	$7,8\pm-0,8$	11,3	27,7	-16,9	73	1 апреля	31 октября
	15	6,7±-0,8	11,0	25,8	-20,8	50	4 апреля	28 октября
	16	$7,3\pm -0,9$	12,5	27,5	-24,0	79	4 апреля	1 ноября

Таблица 1. Параметры термического режима в различных точках водоема

Зона	№ точки	Дневная температура поверхности T, °C				Среднее число дней	Начало стратификации	
		$CI_{95\%}(\overline{T})^*$	$\sigma_{T}$	T <sub>max</sub>	T <sub>min</sub>	в году с t > +20 °С	прямой	обратной
II	1	5,4±-1,0	13,5	28,8	-29,1	63	6 апреля	23 октября
	2	5,1±-1,0	14,3	28,8	-31,4	73	10 апреля	24 октября
	3	5,4±-0,9	12,8	27,7	-30,0	58	7 апреля	26 октября
	7	4,8±-0,9	12,7	25,7	-31,4	50	11 апреля	24 октября
	14	5,2±-0,9	12,1	25,6	-31,2	48	12 апреля	25 октября
	22	4,5±-0,9	12,8	25,6	-28,3	49	13 апреля	24 октября
	23	5,2±-0,9	13,3	26,6	-24,9	63	10 апреля	23 октября
III	6	3,8±-1,0	14,0	26,5	-32,8	55	15 апреля	21 октября
	13	3,6±-0,9	13,4	25,1	-32,7	48	16 апреля	21 октября
	21	3,7±-0,9	13,4	25,1	-29,6	46	18 апреля	21 октября
	28	3,3±-1,0	14,4	26,3	-34,4	53	18 апреля	20 октября
IV	12	2,7±-1,0	14,0	25,4	-31,2	45	27 апреля	20 октября
	18	2,3±-1,0	14,2	25,5	-32,0	48	4 мая	17 октября
	19	2,2±-1,0	14,1	25,2	-29,9	46	5 мая	17 октября
	20	2,6±-1,0	14,0	25,2	-30,9	45	26 апреля	19 октября
V	11	2,6±-1,0	14,4	25,7	-31,4	54	29 апреля	19 октября
	24	2,6±-1,0	14,8	26,3	-36,4	56	26 апреля	19 октября
	25	2,3±-1,0	14,6	26,1	-36,5	49	3 мая	17 октября
	26	2,5±-1,0	14,7	26,7	-34,6	52	26 апреля	17 октября
	27	2,7±-1,0	14,5	26,3	-34,4	52	23 апреля	17 октября
VI	5	4,0±-1,1	14,9	27,5	-33,3	69	13 апреля	24 октября
	10	3,6±-1,1	15,2	29,4	-34,6	71	19 апреля	20 октября
	17	3,2±-1,1	15,0	27,8	-36,3	64	19 апреля	20 октября

Таблица 1. Продолжение

\* — 95%-й доверительный интервал среднегодовых температур поверхности.

Для 28 точек (центроидов пикселей MOD11A2) определены 95%-е доверительные интервалы среднегодовой температуры поверхности и ее стандартные отклонения, минимальная и максимальная наблюдаемая температура. Подсчитано количество дней в году, когда температура поверхности превышает +20 °C, что благоприятно для развития цианобактерий. Наиболее длительный период благоприятной температуры (70 дней и более) отмечается в точках, расположенных возле ГРЭС. Амплитуда годовых колебаний температуры поверхности водоема минимальна возле сбросного канала (в разные годы она составляет от 35 °C до 40 °C), и максимальна в глубоководной части водоема за дамбой (до 50 °C).

Чтобы определить даты начала периодов прямой и обратной стратификации, для каждой точки определены средние даты, когда поверхность водоема весной прогревается до +4 °C, а осенью остывает до +4 °C. Начало периода прямой стратификации в различных точках различается более чем на месяц и приходится на 1 апреля – 5 мая, что объясняется неравномерным таянием льда. Осенью водоем остывает более равномерно: обратная стратификация начинается в разных точках 17 октября — 1 ноября.

Пространственная вариация многолетних среднемесячных температур показана на картах водоема изотермами (*puc. 4*). В зимние месяцы температурные условия в различных точках более разнообразны по сравнению с летом. Изолинии среднемесячных температур отражают тепловое воздействие БГРЭС-1 на водоем.



Рис. 4. Изотермы среднемесячных температур поверхности водоема за 2000-2016 гг.

На основе кластеризации 28 пикселей MOD11A2, лежащих внутри границ водоема, выполнено зонирование водоема-охладителя по среднемесячной температуре.

На *рис. 5* показана сглаженная карта зон, полученная пространственной интерполяцией результата кластеризации пикселей в QuantumGIS.



Рис. 5. Зонирование водоема по среднемесячной температуре поверхности



Рис 6. Среднемесячная температура поверхности по зонам водоема-охладителя

Были выделены шесть зон с различным термическим режимом поверхности водоема, для каждой зоны вычислена среднемесячная температура поверхности (*puc. 6*). Зоны I, II и III расположены в северо-восточной части водоема со стороны БГРЭС-1 и испытывают непосредственное влияние теплового сброса электростанции. Зоны IV, V и VI находятся за дамбой, отсекающей циркуляционный поток горячей воды из сбросного канала. Зоны I–IV характеризуются большей глубиной — до 15 м.; зоны V и VI приходятся на мелководную часть водоема с глубиной до 5 м. Дендрограмма кластеризации показывает сильное отличие по термическому режиму зоны I от остальных зон, что обусловлено ее примыканием к сбросному каналу. В этой зоне проходит основной циркуляционный поток отепленной воды и находится незамерзающая полынья. Остальная часть водоема в зависимости от удаленности от ГРЭС покрывается льдом в ноябре-декабре и освобождается ото льда в марте-апреле. Средняя температура поверхности в январе отличается в зоне I от среднемесячной температуры в мелководной части водоема на 8 °C и более. Зоны II и III занимают промежуточное положение между зоной I и зонами, находящимися за дамбой. Среднемесячная температура поверхности водоема здесь последовательно убывает по мере удаления от станции: зона II с ноября по май теплее зоны III в среднем на 1,5-3 °C. Зоны IV и V имеют близкие значения среднемесячной температуры поверхности, но более глубоководная зона IV медленнее остывает осенью и прогревается весной. Расположенная в мелководной части водоема зона VI в летние месяцы прогревается до температуры, сравнимой с зоной I, а зимой близка по температуре покрытой льдом поверхности к зонам IV и V.

Наибольшее влияние на температуру поверхности водоема оказывают климатические факторы. Летом тепловое влияние БГРЭС-1 на водоем мало по сравнению с процессами теплообмена с атмосферой. В зимние месяцы большая часть водоема покрыта льдом, теплообмен с атмосферой прекращается, а влияние теплового сброса на водоем температуру воды возрастает, что проявляется в большей разнице в температуре между зонами по разную сторону от дамбы (например, между зонами I и V).

#### Заключение

Данные тепловой инфракрасной съемки MODIS позволяют получать временные ряды температуры поверхности водоема-охладителя БГРЭС-1 с равномерным в течение года временным разрешением, значительно превышающим временное разрешение Landsat (TIRS, ETM+). При этом пространственные вариации температуры поверхности внутри пикселя MODIS для однородных поверхностей водоема невелики (в пределах 1-2 °C для большинства пикселей), что позволяет изучать по данным продукта MOD11A2 методами геостатистики пространственное распределение температуры в течение года.

Анализ временных рядов температуры поверхности водоема-охладителя БГРЭС-1, полученных по данным MOD11A2, позволил выявить различия в термическом режиме для различных точек акватории. Построенные карты изотерм среднемесячной температуры поверхности демонстрируют значительное влияние теплового сброса БГРЭС-1 на водоем (особенно в зимние месяцы). Зонирование водоема на основе среднемесячной температуры поверхности, вычисленной по данным MOD11A2, подчеркивает различия в термическом режиме между разделенными дамбой западной и восточной частями водоема. Циркуляционный поток от сбросного канала к водозабору БГРЭС-1 проходит в основном в малой по площади зоне возле станции, что снижает эффективность охлаждения воды и приводит к риску эвтрофикации водоема. Авторы выражают искреннюю благодарность NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota за полученные через ресурс https://lpdaac.usgs.gov/ данные и изображения.

## Литература

- 1. *Афонин С.В.* Применение физического и регрессионного подходов к измерению температуры поверхности суши по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 9–15.
- 2. *Буканова Т.В., Стонт Ж.И., Гущин О.А.* Изменчивость температуры поверхности моря в юго-восточной Балтике по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 4. С. 86–96.
- 3. *Горбунов М.Ю*. Вертикальная стратификация водных масс в малых озерах лесостепного Поволжья // Известия Самарского научного центра РАН. 2007. Т. 9. № 4. С. 973–986.
- 4. *Морозова О.Г., Пен Р.З., Репях С.М.* Особенности формирования гидрохимического режима водоема-охладителя Березовской ГРЭС-1: Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 214 с.
- 5. *Морозова О.Г., Пен Р.З., Фоменко Ю.П.* Принципы оптимизации качества воды водоема-охладителя БГР-ЭС-1 для технологических целей и аквакультуры: Красноярск: СФУ, 2011. 185 с.
- 6. Топачевский А.В., Пидгайко М.Л. Цели и задачи гидробиологического исследования водоемов-охладителей тепловых электростанций // Гидрохимия и гидробиология водоемов-охладителей тепловых электростанций СССР. Киев: Наукова думка, 1971. С. 6–10.
- 7. *Шур Л.А.* Фитопланктон как индикатор состояния экосистемы водоема-охладителя Березовской ГРЭС-1 (Красноярский край) // Водные ресурсы. 2009. Т. 36. № 5. С. 597–605.
- 8. *Congedo L*. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. 2016. DOI: http://dx.doi.org/10.13140/ RG.2.2.29474.02242/1
- 9. *Kilpatrick K.A., Podestá G., Walsh S., Williams E., Halliwell V., Szczodrak M., Brown O.B., Minnett P.J., Evans R.* A decade of sea surface temperature from MODIS // Remote Sensing of Environment. 2015. Vol. 165. P. 27–41.
- 10. Lürling M., Eshetu F., Faassen E.J., Kosten S., Huszar V.L.M. Comparison of cyanobacterial and green algal growth rates at different temperatures // Freshwater Biology. 2013. Vol. 58. P. 552–559.

# Thermal regime of the pond-cooler surface of Beryozovskaya GRES-1 from MODIS data

## A.S. Savel'ev, O.G. Morozova, N.S. Veselkova

Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660041, Russia E-mail: andrey.s.saveliev@gmail.com

The surface temperature of a reservoir is one of major factors of eutrophication. A discharge of heated water from thermal power plants is the cause for the increase in water temperature in pond-coolers, which can lead to negative consequences for the ecosystem of water bodies. The water temperature is controlled by ground-based measurements in the framework of water quality monitoring. The use of remote sensing methods allows expanding time series of observations and improving its spatial resolution. The work is devoted to the study of thermal regime of the surface of the pond-cooler of Beryozovskaya GRES-1 from MODIS spectroradiometer data. The applicability of MOD11A2 scenes for monthly-average temperature mapping and reservoir zoning in large scale was shown by overlapping them on Landsat scenes (TIRS, ETM+) shot on the same day. For homogeneous surfaces, there is slight temperature variability in the section of the reservoir corresponding to a MODIS pixel. Data processing and analysis was performed using open source GIS Quantum GIS. Time series of surface temperature were constructed at various points in the reservoir on the basis of MODIS/Terra Level-3 MOD11A2 scenes for the period 2000–2016. The parameters of the thermal regime are determined from these time series: the minimum and maximum surface temperatures, the average dates of the beginning of the period of direct and reverse stratification. Analysis of the obtained time series for different points revealed spatial variations of the thermal regime of the reservoir. In winter, the effect

of the thermal discharge of BGRES-1 on the temperature of the surface layer is much stronger than in summer. The zoning of the reservoir-cooler was performed by the method of agglomerative hierarchical clustering and the mean monthly temperatures for the obtained zones were calculated. The circulation flow of heated water from the discharge channel to the water intake of the station passes in a small area around the station. It reduces the efficiency of cooling water and leads to a risk of eutrophication of the reservoir.

**Keywords:** Beryozovskaya GRES-1, eutrophication, reservoir-cooler, surface temperature, stratification, MODIS, MOD11A2 product, map, isolines, zoning, clustering

*Accepted*: 07.07.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-177-189

#### References

- 1. Afonin S.V., Primenenie fizicheskogo i regressionnogo podkhodov k izmereniyu temeperatury poverkhnosti sushi po dannym MODIS (The application of physical-based approach and split-window algorithm to the measurement of land surface temperature using MODIS data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 9–15.
- 2. Bukanova T.V., Stont Zh.I., Gushchin O.A., Izmenchivost' temperatury poverkhnosti morya v yugo-vostochnoi Baltike po dannym MODIS (Variability of sea surface temperature in the South-Eastern Baltic Sea from MODIS data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 4, pp. 86–96.
- 3. Gorbunov M.Yu., Vertikal'naya stratifikatsiya vodnykh mass v malykh ozerakh lesostepnogo Povolzh'ya (Vertical Stratification of water mass small lakes of forrest-steppe region of Volga Basin), *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2007, Vol. 9, No. 4, pp. 973–986.
- 4. Morozova O.G., Pen R.Z., Repyakh S.M., *Osobennosti formirovaniya gidrokhimicheskogo rezhima vodoema-okhladitelya Berezovskoi GRES-1* (Particular properties of formation of the hydro-chemical regime in Beryozovskaya GRES-1 water-cooling reservoir), Novosibirsk, Izdatel'stvo SO RAN, 2001, 214 p.
- Morozova O.G., Pen R.Z., Fomenko Yu.P., Printsipy optimizatsii kachestva vody vodoema-okhladitelya BGRES-1 dlya tekhnologicheskikh tselei i akvakul'tury (Water quality optimization principles for technological needs and aquaculture in Beryozovskaya GRES-1 water-cooling reservoir), Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2011, 185 p.
- Topachevskii A.V., Pidgaiko M.L., Tseli i zadachi gidrobiologicheskogo issledovaniya vodoemov-okhladitelei teplovykh elektrostantsii (Purposes and tasks of hydro-biological researches of thermal power plants cooling reservoirs), *Gidrokhimiya i gidrobiologiya vodoemov-okhladitelei teplovykh elektrostantsii SSSR*, Kiev, Naukova dumka, 1971, pp. 6–10.
- Shchur L.A., Fitoplankton kak indikator sostoyaniya ekosistemy vodoema-okhladitelya Berezovskoi GRES-1 (Krasnoyarskii krai) (Phytoplankton as an indicator of ecosystem state of water-cooling reservoir at Berezovskaya SDPP-1 (Krasnoyarsk Territory)), *Vodnye resursy*, 2009, Vol. 36, No. 5, pp. 597–605.
- 8. Congedo L., Semi-Automatic Classification Plugin Documentation, 2016, available at DOI: http://dx.doi. org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1.
- Kilpatrick K.A., Podestá G., Walsh S., Williams E., Halliwell V., Szczodrak M., Brown O.B., Minnett P.J., Evans R., A decade of sea surface temperature from MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 2015, No. 165, pp. 27–41.
- 10. Lürling M., Eshetu F., Faassen E.J., Kosten S., Huszar V.L.M., Comparison of cyanobacterial and green algal growth rates at different temperatures, *Freshwater Biology*, 2013, No. 58, pp. 552–559.