



УДК 556.555.4; 528.85

Использование данных дистанционного спутникового зондирования для картографического отображения и анализа распределения температуры поверхности воды озера Байкал

Е. Н. Сутырина (ensut@rambler.ru)

Аннотация. Температура поверхности воды является одним из косвенных показателей динамики водоемов, а также тесно связана с функционированием экосистемы. В статье представлены результаты применения данных радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) для картографирования и анализа распределения температуры поверхности воды оз. Байкал, обнаружения зон апвеллинга и вихревых образований, изучения динамики термических фронтов.

Ключевые слова: данные AVHRR, Байкал, температура поверхности воды, термический барьер, апвеллинг.

Актуальность

Информация о пространственно-временном распределении температуры поверхности воды необходима для оценки накопления и расхода тепла водной массой в результате ее теплообмена с атмосферой и ледом озера, расчета теплового баланса, разработки методов прогноза сроков вскрытия и замерзания водоема. Температура воды является важнейшим параметром, позволяющим выявить климатические изменения [5; 8; 15]. В связи с этим постоянный мониторинг и оперативное картографирование температуры поверхности воды необходимы при изучении глобального и локального изменения климата.

Температура поверхности воды может использоваться для наблюдения за глубинными разломами, так как они являются зонами повышенной проницаемости земной коры и служат проводящими путями растворов и газов, как правило, более высокотемпературных по сравнению с поверхностью дна озера, что приводит к уникальным современным явлениям и процессам, в том числе появлению аномалий в распределении температуры поверхности воды [1].

Температура поверхности воды является важной характеристикой состояния экосистемы озера. Она характеризует сезонные изменения состояния стратификации водной толщи. Дважды в год, в периоды весенней и осенней конвекции, она близка к температуре перемешанного слоя толщиной до 150 м [14]. Пространственно-временные изменения температуры

воды являются также одним из важнейших показателей биологической продуктивности акватории, на которую она оказывает как прямое, так и косвенное влияние. Температура воды определяет условия местообитания озерной флоры и фауны [20; 25]. Также температура воды является одним из определяющих параметров газообмена между водной средой и атмосферой [12].

Кроме этого температура играет значительную роль в возникновении и поддержании циркуляции и перемешивания в озере [6, 7]. По картам распределения температуры поверхности воды можно косвенно анализировать такие динамические явления, как течения, апвеллинг, перераспределение речных вод, термический барьер (термобар), вихревые структуры и др. [9; 10; 21; 24; 26].

Для изучения многих лимнологических процессов и понимания озерной гидродинамики полезно иметь систематические данные о пространственно-временном распределении температуры поверхности за продолжительный период времени, которые стали доступны с развитием дистанционных спутниковых средств мониторинга состояния поверхности Земли.

Материалы и методы

В рамках данного исследования были обработаны и проанализированы данные радиометра AVHRR за период с 1998 по 2012 гг., отобранные из архива телеметрии Центра космического мониторинга Института солнечно-земной физики СО РАН. Радиометр AVHRR установлен на борту полярно-орбитальных метеорологических спутников серии NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration – аббревиатура Национального управления океанов и атмосферы США). Спутники серии NOAA летают на высоте приблизительно 850 км по синхронизированным с Солнцем орбитам.

Радиометр AVHRR представляет собой типичный сканер и измеряет собственное и отраженное Землей излучение в пяти спектральных диапазонах: 0,58–0,68 мкм; 0,725–1,0 мкм; 3,55–3,93 мкм; 10,3–11,3 мкм; 11,4–12,4 мкм [11]. Линейный размер элемента разрешения на местности радиометра AVHRR составляет около 1,1 км в надире. Полученное изображение охватывает полосу земной поверхности шириной 2700 км по трассе движения спутника, что обеспечивает полный обзор как акватории, так и всего водосборного бассейна оз. Байкал за один пролет.

Изображения со спутников передаются на Землю в реальном масштабе времени на частоте 1700 МГц в режиме HRPT (High Resolution Picture Transmission). Возможность свободного приема спутниковой информации наземными станциями обеспечивается Всемирной метеорологической организацией (ВМО) согласно концепции «Открытого неба».

Для обработки спутниковых снимков в работе были использованы средства программного комплекса «Sputnik», разработанного Институтом космических исследований РАН и предназначенного для проведения обработки данных различных систем дистанционного зондирования [3]. Выбор

программного обеспечения во многом обусловлен тем, что большинство существующих программных комплексов, предназначенных для обработки спутниковой информации, в основном ориентировано на ее интерактивную обработку. В то же время в последние годы стали особенно актуальны задачи создания автоматизированных систем обработки спутниковых данных и для их решения требуется специализированный программный инструментарий.

Технологическая схема обработки спутниковых данных включала следующие этапы:

- предварительную обработку, представляющую собой подготовку изображений к тематической обработке (выравнивание динамических диапазонов, уточнение привязки на основе адаптированной автором системы [17; 18], преобразование картографической проекции, и т. д.);
- расчет температуры поверхности воды оз. Байкал по разработанному автором региональным алгоритмам тематической обработки данных AVHRR, основанным на дифференцированном определении температуры в различное время года, использовании нелинейных зависимостей и дополнительном привлечении информации видимого и ближнего инфракрасного каналов в дневное время суток [16], которые позволяют определять температуру поверхности воды с точностью до 0,4 К в ночное время и до 0,3 К – в дневное время суток;
- представление данных.

Последний этап – один из важных видов обработки и анализа данных. Формы представления данных в значительной степени зависят от характера приложений используемой процедуры обработки. Для задач исследования пространственной и временной изменчивости гидрофизических характеристик одним из наиболее подходящих способов является представление данных в виде карт. Средства визуализации позволяют сформировать визуальные представления для результатов анализа спутниковых снимков. Использование цвета при визуализации изображения обусловлено тем, что цвет облегчает распознавание и выделение объекта на изображении, и что человек в состоянии различать тысячи различных оттенков цвета и всего лишь около двух десятков оттенков серого.

В программе «Sputnik» для визуализации применяется модель RGB (Red; Green; Blue). Модель RGB – аппаратно-ориентированная модель, используемая в дисплеях для аддитивного формирования оттенков самосвещающихся объектов (например, пикселей экрана). Цвет в этой цветовой модели описывается тремя значениями в диапазоне от 0 до 255. Каждое значение соответствует одному из базовых цветов и указывает на его содержание в данном цвете. Значения записывают в следующем порядке: красная, зеленая и синяя составляющие.

В рамках данного исследования в соответствии с внутренним синтаксисом программы «Sputnik» были разработаны файлы палитр на основании дискретной шкалы для картографического отображения температуры поверхности воды озера Байкал с помощью картознаков количественного грид-отображения.

Обсуждение результатов

В результате проделанной работы для условий открытого водоема были составлены серии электронных и анимационных карт температуры поверхности воды оз. Байкал за период с 1999 по 2012 г.

Ниже, в качестве примера, приведена серия тематических карт, полученная путем дешифрирования спутниковых снимков по разработанным автором алгоритмам (рис. 1). На серии карт представлено распределение температуры поверхности воды оз. Байкал в 2010 г.

На карте за 12 июня (см. рис. 1 а) практически на всей акватории озера (за исключением мелководных заливов и проливов) наблюдается гомотермия. Эта ситуация является характерной для этого периода и наблюдается ежегодно. К концу июня – началу июля все более отчетливо прослеживается неоднородное распределение температуры на поверхности озера вследствие влияния притока речных вод, течений и донного рельефа. В целом с июля до середины октября ежегодно наблюдается понижение температуры поверхности воды от берегов озера к его центральным глубоководным частям, что можно наблюдать на представленных картах за соответствующий период (см. рис. 1, б–г). Начиная со второй половины октября до ледостава (см. рис. 1, д–е) наблюдается обратная картина в распределении температуры на поверхности озера: температура в центральных частях озера в связи со значительной тепловой инерцией больших объемов воды превышает температуру в мелководных заливах и проливах. На карте за 7 ноября (см. рис. 1, е) на всей акватории озера (за исключением мелководных частей озера, где температура близка к 0 °С) наблюдается осенняя гомотермия.

Полученные карты распределения температуры поверхности воды хорошо согласуются с результатами проводимых ранее многолетних исследований других авторов [2; 4; 19; 22].

Как было отмечено выше, температура поверхности воды является одним из косвенных показателей динамических явлений в водоеме. На карте за 23 августа (см. рис. 1, в) в виде пятен и полос более холодных вод различимо наличие зон прибрежного апвеллинга у западного берега в Северном Байкале, у северного побережья о. Ольхон и на южной оконечности Байкала в южной котловине.

Согласно составленным по спутниковым данным картографическим материалам прибрежный апвеллинг наблюдается ежегодно, наиболее обширные зоны прибрежного апвеллинга имеют место у западного побережья в Северном Байкале. Наибольшее число всех случаев возникновения прибрежного апвеллинга наблюдается в августе.

На той же карте за 23 августа (см. рис. 1, в) в Южном Байкале в центре горизонтального циклонического вихря наблюдается динамический подъем глубинных вод (явление динамического апвеллинга); зона динамического апвеллинга занимает порядка 20 % от акватории Южного Байкала.

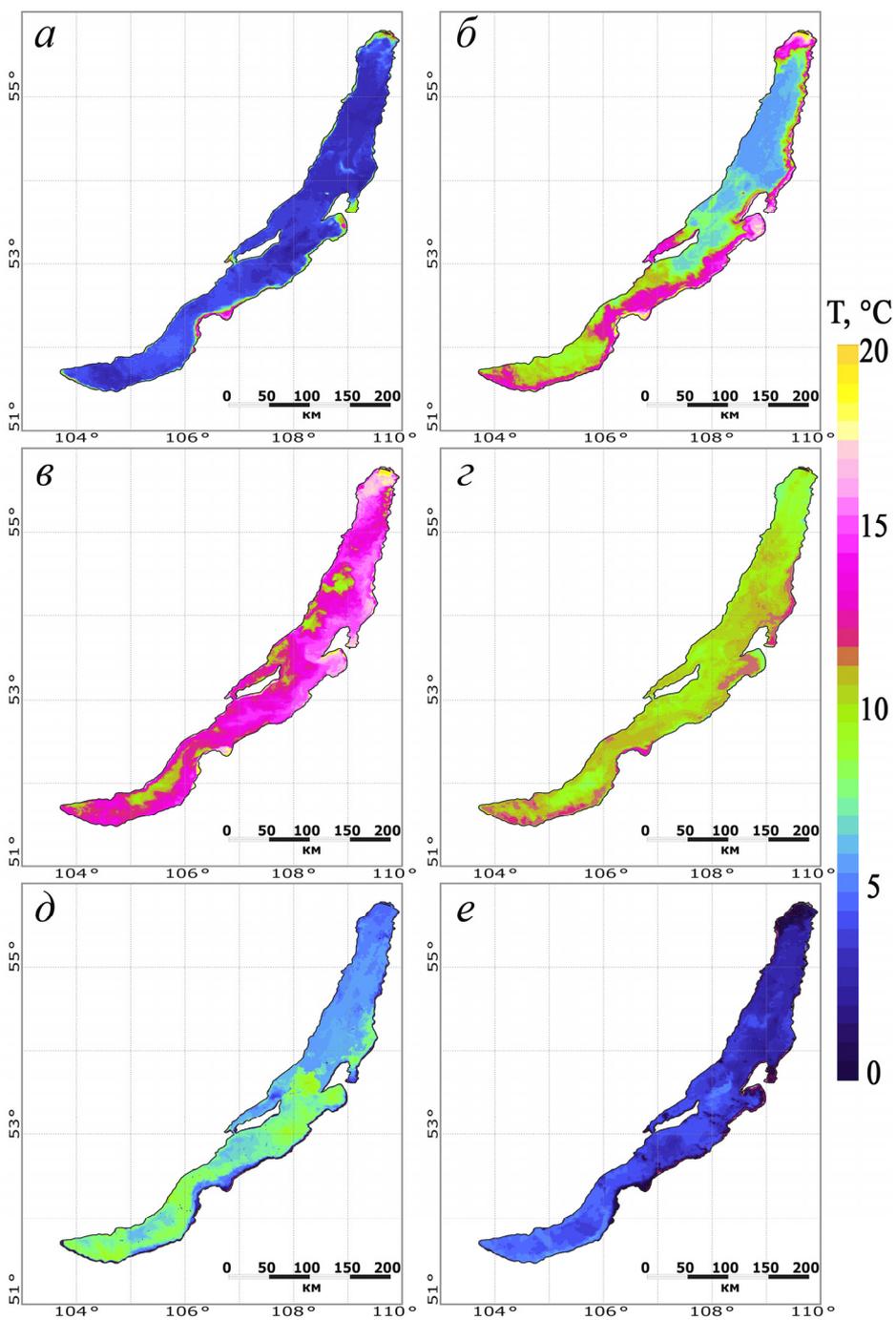


Рис. 1. Распределение температуры поверхности воды оз. Байкал в 2010 г. :
а – 12 июня, б – 18 июля, в – 23 августа, г – 26 сентября, д – 18 октября, е – 7
ноября

Динамический апвеллинг наиболее отчетливо определяется по спутниковым снимкам в Южном Байкале, но может наблюдаться и в других частях озера.

Температурные контрасты зон динамического и прибрежного апвеллинга с окружающими водами на карте за 23 августа достигают $6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Полученные по спутниковым данным характеристики апвеллинга не противоречат данным, полученным по береговым наблюдениям, приведенным в [13].

Вихревые образования проявляются на снимках из космоса, полученных в инфракрасном диапазоне спектра, и на созданных на их основе картах распределения температуры поверхности воды за счет характерной спиралевидной структуры (рис. 2).

Вихревые образования прослеживаются с июля по октябрь. По картам за соответствующий период (см. рис. 1, б–д) были определены дислокация и размеры вихревых образований. Наибольшие вихревые образования, различимые на указанных картах, имеют размеры около 20–28 км в поперечнике.

Наиболее заметное антициклоническое вихревое образование появляется на выходе из Баргузинского залива в середине июля, постепенно увеличивается в размерах, достигая максимума в августе, распадается только в октябре и наблюдается ежегодно.

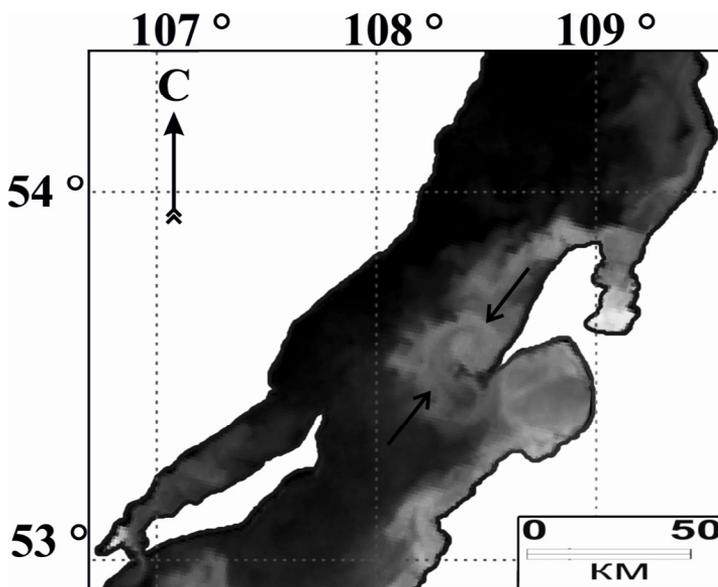


Рис. 2. Вихревое образование (показано стрелками) на снимке AVHRR 4 канала от 8 августа 2010 г., прошедшем радиометрическую и геометрическую коррекцию

По картам распределения температуры поверхности воды с середины мая до середины июля можно отчетливо различить локализацию термобара, характеристики термоактивной и термопассивной зон и фронтального раздела, изучать их динамику. Термобар возникает в указанный период из-за больших различий в прогреве прибрежных и озерных вод на отдельных участках и является границей между теплыми прибрежными и холодными водами открытого озера [9; 23].

Ниже приведены схемы изменения во времени положения термического фронта при термобаре, полученные на основании анализа спутниковых карт распределения температуры поверхности воды в 2011 г.

Указанные схемы составлены для Чивыркуйского и Баргузинского заливов (рис. 3), северной оконечности Байкала (рис. 4), пролива Малое море (рис. 5).

Характер перемещения термического фронта согласно схемам во многом определяется особенностями донного рельефа указанных акваторий.

Перепад температур на поверхности достигает $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$.

В нижней части на рис. 3 представлены последовательные положения термического фронта в Баргузинском заливе. Термический фронт со временем перемещается в сторону открытой части озера и до 1 июля успевает обогнуть п-ов Святой Нос, где в дальнейшем участвует в формировании вихревой структуры обсуждаемой ранее (см. рис. 2). Таким же образом термический фронт выходит за пределы Чивыркуйского залива.

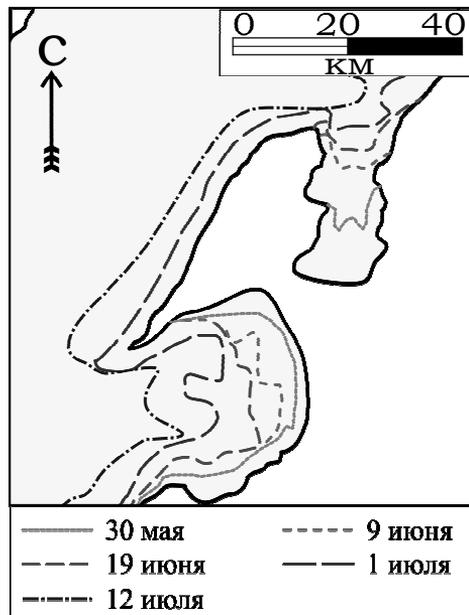


Рис. 3. Последовательные положения термического фронта в Баргузинском (внизу) и Чивыркуйском (вверху) заливах в 2011 г.

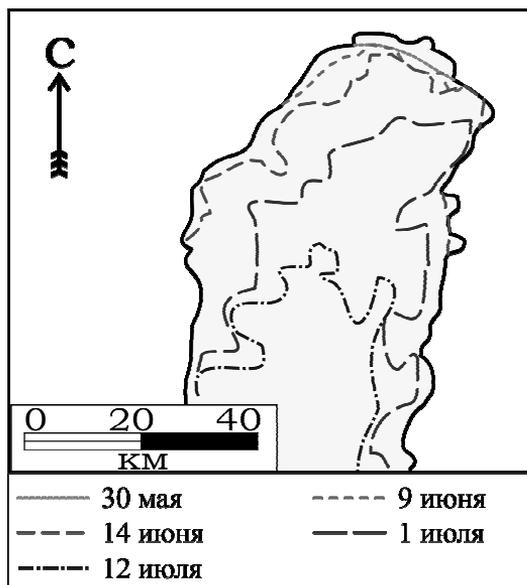


Рис. 4. Последовательные положения термического фронта на севере Байкала в 2011 г.

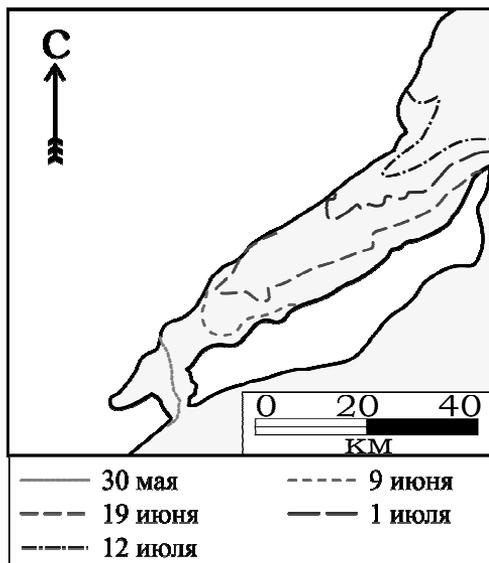


Рис. 5. Последовательные положения термического фронта в проливе Малое Море в 2011 г.

Очень высокая скорость смещения термического фронта наблюдается на северной оконечности Байкала (см. рис. 4) и в проливе Малое море (см. рис. 5). В проливе Малое море в среднем скорость смещения фронта составляет 1 км/сут., в период с 19 июня по 1 июля скорость увеличивается до 2 км/сут. На севере Байкала средняя скорость перемещения фронта составляет 0,9 км/сут., увеличиваясь до 1,1 км/сут. в период с 1 июля по 12 июля.

В целом полученные пространственные данные о термобаре согласуются с исследованиями данного явления, проводимыми сотрудниками Лимнологического института СО РАН ранее [9; 23].

Выводы

В результате проделанной работы были:

- разработаны серии электронных и анимационных карт температуры поверхности воды оз. Байкал;
- на основе полученных материалов проведен анализ пространственно-временного распределения характеристик температуры поверхности воды на оз. Байкал;
- на основании анализа контрастов температуры, текстуры участков спутникового изображения исследовано положение и основные характеристики различных динамических явлений в озере.

Разработанная в рамках настоящего исследования методика тематического картографирования полей температуры поверхности воды оз. Байкал может быть использована и в оперативной практике, и для изучения долговременных изменений температуры по архивным спутниковым данным. При этом тематическое картографирование температуры поверхности воды по спутниковым снимкам не только позволяет получать информацию о пространственно-временном распределении важнейшей характеристики состояния экосистемы озера – температуры поверхности воды, но и на основании этой информации составлять карты полей других важных физических характеристик озера в течение навигационного периода:

- карты распределения температуры воздуха на высоте 2 м;
- карты распределения величины элементов теплового баланса;
- карты течений на поверхности и т. д.

Концепция применения данных дистанционного зондирования к изучению температурного режима озера позволяет проводить более детальный анализ пространственно-временного распределения температуры в поверхностном слое оз. Байкал, чем при съемке наземными средствами.

На основе анализа результатов дешифрирования спутниковых изображений становится возможной реализация карт контроля состояния водных объектов. Применение новых технологий компьютерной обработки данных дистанционного спутникового зондирования позволяет формировать и постоянно дополнять базу пространственной информации об озере.

Позитивный опыт построения автоматизированных систем обработки и представления спутниковой информации выявил перспективность этого

рода деятельности и высокую заинтересованность в спутниковых данных как для проведения фундаментальных исследований, так и для решения различных прикладных задач, в том числе, задач охраны окружающей среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12–05–31100) и программы стратегического развития федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет» на 2012–2016 гг.

Список литературы

1. Бондур В. Г. Физическая природа линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий / В. Г. Бондур, А. Т. Зверев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов : сб. науч. ст. – М. : Азбука-2000, 2006. – Вып. 3, т. 2. – С. 177–183.
2. Верболов В. И. Гидрометеорологический режим и тепловой баланс озера Байкал / В. И. Верболов, В. М. Сокольников, М. Н. Шимараев. – М. : Наука, 1965. – 374 с.
3. Возможности построения автоматизированных систем обработки спутниковых данных на основе программного комплекса XV_SAT / В. А. Егоров [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений : сб. ст. – М. : Полиграф сервис. – 2004. – С. 431–436.
4. Галазий Г. И. Климат и гидрометеорологические условия. Байкал : атлас / Г. И. Галазий. – М., 1993. – С. 8–9.
5. Герман М. А. Космические методы исследования в метеорологии / М. А. Герман. – Л. : Гидрометеиздат, 1985. – 352 с.
6. Граньков, А. Г. Взаимосвязь радиоизлучения системы океан-атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на границе раздела / А. Г. Граньков, А. А. Мильшин. – М. : Физматлит, 2004. – 168 с.
7. Здоровеннова Г. Э. Термическая структура мелководного озера в период ледостава: внутрисезонная и межгодовая изменчивость : дис. ... канд. геогр. наук / Г. Э. Здоровеннова. – СПб., 2007. – 179 с.
8. Исследование океана из космоса / Б. А. Нелепо [и др.]. – Киев : Наукова думка, 1985. – 168 с.
9. Использование спутниковых наблюдений для исследования термических фронтов озера Байкал / С. В. Семовский [и др.] // Исследование земли из космоса, 1998. – № 5. – С. 65–76.
10. Казьмин А. С. Фронты Бенгальского апвеллинга: анализ судовой и спутниковой информации / А. С. Казьмин // Исслед. Земли из космоса. – 1992. – № 5. – С. 44–55.
11. Кашкин В. Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений : учеб. пособие / В. Б. Кашкин, А. И. Сухонин. – М. : Логос, 2001. – 264 с.

12. Мизандронцев И. Б. Газообмен между водной средой и атмосферой (на примере Байкала) / И. Б. Мизандронцев, К. Н. Мизандронцева // *Вод. ресурсы.* – 1995. – № 22 (4). – С. 439–445.
13. Об апвеллингах в озере Байкал / М. Н. Шимараев [и др.] // *Докл. Академии наук.* – 2012. – Т. 442, № 5. – С. 696–700.
14. Особенности распределения характеристик экосистемы пелагиали Байкала в период весенней конвекции / Н. Г. Гранин [и др.]. – Красноярск: Ин-т биофизики СО РАН, 1991. – 54 с.
15. Спутниковая гидрофизика / Б. А. Нелепо [и др.]. – М.: Наука, 1983. – 256 с.
16. Сутырина Е. Н. Картографическое отображение и анализ гидрофизических характеристик озера Байкал, детектируемых дистанционным спутниковым зондированием: автореф. дис. ... канд. геогр. наук / Е. Н. Сутырина. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2009. – 20 с.
17. Сутырина Е. Н. Компьютерные методы географической привязки спутниковых изображений озера Байкал / Е. Н. Сутырина // *Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та.* – 2009. – Т. 37, № 1. – С. 42–46.
18. Сутырина Е. Н. Технология автоматизированного определения характеристик поверхностного слоя оз. Байкал по данным радиометра AVHRR / Е. Н. Сутырина // *Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле.* – 2008. – Т. 1, № 1. – С. 198–207.
19. Шимараев М. Н. Элементы теплового режима озера Байкал / М. Н. Шимараев. – Новосибирск: Наука, 1977. – 150 с.
20. Bolgrien D. W. Delineation of the hydrodynamics of Lake Michigan and Lake Baikal using satellite-derived surface temperatures: A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for Degree of Doctor of Philosophy / D. W. Bolgrien. – The Univ. of Wisconsin-Milwaukee, 1993. – 170 p.
21. Malm J. A study of the thermal bar in Lake Ladoga using water surface temperature data from satellite images / J. Malm, L. Jonsson // *Remote sensing of Environment*, 1993. – N 44. – P. 35–46.
22. Physical limnology of Lake Baikal: A review: Print. N 2 / М. N. Shimaraev [et al.]. – Irkutsk; Okayama: Baikal International Center for Ecological Research, 1994. – 81 p.
23. Shimaraev M. N. Deep ventilation of Lake Baikal due to spring thermal bars / М. N. Shimaraev, N. G. Granin, A. A. Zhdanov // *Limnol., oceanogr.*, 1993. – No. 38. – P. 1068 – 1072.
24. The effect of coastal upwelling on the sea-breeze circulation at Cabo Frio, Brazil: a numerical experiment [Text] / S. H. Franchito [et al.] // *Ann. Geophysicae.* – 1998. Vol. 16, P. 866 – 881.
25. Thomas A. C. Relationship between near-surface plankton concentration, hydrography, and satellite-measured sea surface temperature [Text] / A. C. Thomas, W. J. Emery // *J. Geophys. Res.*, 1988. – N 93 (C12). – P. 15733–15748.
26. Udarbe-Walker M. J. Structure of potential upwelling areas in the Philippines [Text] / M. J. Udarbe-Walker, C. L. Villanoy // *Deep-Sea Res. I.* – 2001. – Vol. 48 – P. 1499–1518.

The use of satellite remote sensing data for the mapping and analysis of the Lake Baikal water surface temperature distribution

E. N. Sutyryna

Annotation. Water surface temperature is a one of indirect tracers of water bodies dynamics and closely tied to ecosystem functions. The results of the use of AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) data for the mapping and analysis of the Lake Baikal water surface temperature distribution, detection of upwelling event and vorticities, exploration of thermal fronts movements are presented in this paper.

Key words: AVHRR data, Lake Baikal, water surface temperature, thermal bar, upwelling.

*Сутырина Екатерина Николаевна
кандидат географических наук, доцент
Иркутский государственный университет
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: (3952) 52–10–72*

*Sutyryna Ekaterina Nikolaevna
Ph. D. in Geography, Assistant professor
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003
tel.: (3952) 52–10–72*