Распределение прозрачности воды в озере Байкал по данным радиометра AVHRR

Е.Н. Сутырина

*Иркутский государственный университет, Иркутск, 664003, Россия
E-mail: ensut78@gmail.com*

Связь прозрачности воды с содержанием в ней взвесей и растворенных веществ органического и неорганического происхождения позволяет отнести прозрачность к важнейшим физическим показателям качества воды. Цель данного исследования заключалась в оценке характеристик пространственно-временного распределения прозрачности воды в поверхностном слое озера Байкал с использованием материалов дистанционного зондирования со спутников, так как дистанционное зондирование является незаменимым инструментом в изучении крупных внутренних водоемов, включая озеро Байкал с площадью акватории в 31,7 тыс. км². В рамках настоящего исследования была разработана региональная методика определения условной прозрачности воды в поверхностном слое озера Байкал по данным AVHRR на основании сопоставления массивов судовой и спутниковой информации, с использованием разработанных алгоритмов были составлены серии карт распределения условной прозрачности в поверхностном слое озера Байкал на всей его акватории в период с июня по октябрь в различные годы, изучен ход средних значений прозрачности воды в поверхностном слое в отдельных районах озера и на всей акватории в целом и дана оценка основных особенностей пространственно-временного распределения прозрачности воды в поверхностном слое озера Байкал в период открытого водоема.

Ключевые слова: озеро Байкал, условная прозрачность воды, данные радиометра AVHRR, пространственно-временное распределение, региональная методика

*Одобрена к печати: 08.02.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-95-103*

Введение

Прозрачность воды определяется ее избирательной способностью поглощать и рассеивать световые лучи и зависит от условий освещения поверхности, изменения спектрального состава и ослабления светового потока, а также связана с концентрацией и характером присутствующих в воде нерастворенных и коллоидных веществ неорганического и органического происхождения (Шерстянкин, 1974; Наumenко, 2013). Так как величина прозрачности воды сопряжена с количеством взвешенных частиц и других загрязнителей в воде, то ее, наряду с температурой, запахом, вкусом, цветностью и плотностью, относят к одним из важнейших физических показателей качества воды (Шитиков, Розенберг, Зинченко, 2003). Помимо этого зависимость прозрачности природных вод от содержания в них взвесей и растворенных веществ органического и неорганического происхождения позволяет использовать измерения прозрачности для идентификации водных масс различного генезиса, исследования фронтальных разделов и т.д. (Шерстянкин, 1974; Китаев, 1984). Прозрачность, играющую значительную роль в жизни водоемов, часто выделяют в число основных признаков, характерных для типизации озер (Китаев, 1984).

Наблюдения за прозрачностью воды в озере Байкал ведутся с начала XX века и продолжают в настоящее время. Весомый вклад в изучение прозрачности внесли работы, выполняемые в различное время сотрудниками Лимнологического института СО РАН (Шерстянкин, Каплин, Максимов, 1972; Шерстянкин, 1974; Поповская и др., 2008) и Научно-исследовательского института биологии Иркутского государственного университета (Kozhov, 1963).

Для изучения особенностей распределения прозрачности воды в поверхностном слое озера Байкал, имеющего размеры акватории в 31,7 тыс. км², привлечение данных дистанционного зондирования дает возможность наблюдать за состоянием всего водоема и получать качественно новую пространственно-временную информацию о происходящих в озере процессах, которую невозможно получить с использованием только судовых наблюдений.

Использованные материалы

В рамках данного исследования для изучения особенностей пространственно-временного распределения прозрачности воды в поверхностном слое озера Байкал в период открытого водоема были использованы данные радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) за период с 1998 по 2015 гг., отобранные из архива 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). Линейный размер элемента разрешения на местности радиометра AVHRR составляет около 1,1 км в надире. Полоса обзора радиометра AVHRR в 2700 км позволяет охватить всю акваторию озера Байкал за один пролет.

Методы исследования

Отражательные свойства различных объектов играют очень важную роль при их идентификации и изучении их свойств. В видимой части спектра характер отражения электромагнитного излучения водой позволяет оценивать ряд аспектов состояния воды, так как на параметры отражения водой в значительной мере влияет концентрация, тип и размер взвешенных в воде органических и неорганических веществ, а следовательно, и прозрачность вод водоема. Согласно (Dev, Shanmugam, 2014), положения кривых спектральной отражательной способности мутной и чистой воды существенно различаются в видимой области спектра. Так, в спектральном диапазоне 0,59–0,69 мкм, который соответствует 1 каналу AVHRR, отражательная способность чистой воды, как правило, низкая. При уменьшении прозрачности как за счет увеличения содержания взвешенных веществ, так и при цветении водоема, в указанном выше диапазоне наблюдается повышение отражательной способности.

Кроме того, что спектральная отражательная способность водной поверхности, как было отмечено выше, определяется характером и концентрацией взвешенных в воде частиц, а следовательно, и прозрачностью воды, на параметры отражения также влияют высота стояния солнца, облачность, степень волнения и глубина. Существенное влия-

ние на величину альбедо водной поверхности оказывает высота солнца. Вследствие этого выявление остальных указанных зависимостей возможно лишь при фиксированных высотах солнца (Неелова, 2007).

Для учета вклада в величину альбедо 1 канала AVHRR высоты солнца в работе при сопоставлении с измерениями условной прозрачности использовались значения нормализованного альбедо. Влияние облачности минимизировано фильтрацией облачности и расчетом минимальных значений альбедо по всем доступным снимкам, попадающим в 200-минутный интервал времени между спутниковыми и судовыми съемками. Помимо уменьшения помех от полупрозрачной облачности расчет минимального альбедо позволяет снизить влияние волнения на величину альбедо. Также необходимо отметить, что при волнении изменяется не только альбедо поверхности, но и сама величина условной прозрачности (Шамраев, Шишкина, 1980), что уменьшает вклад данного фактора в точность определения величины прозрачности по значению альбедо.

Глубина проникновения в чистую воду электромагнитного излучения с длинами волн в диапазоне 0,59–0,69 мкм, соответствующему 1 каналу AVHRR, согласно (Physical basis of...) оценивается в 3 м для чистой воды и в 0,3 м для мутной воды. Таким образом, на подавляющей части акватории озера Байкал глубина водоема не будет оказывать влияния на характер отражения.

Для разработки региональной методики оценки прозрачности воды в поверхностном слое озера Байкал по спутниковым данным использовался массив судовой и спутниковой информации, причем различия по времени спутниковых измерений с соответствующими судовыми составляло для каждой из 138 точек не более 200 минут. Судовые измерения условной прозрачности производились во все месяцы безледоставного периода с научно-исследовательских судов Лимнологического института СО РАН в 1998, 1999 и 2002 гг. и охватывали значительную часть акватории озера Байкал с широким диапазоном глубин.

В результате были получены зависимости величины условной прозрачности D_s , м, от нормализованного альбедо 1 канала AVHRR A_1 , %: для периода с начала июня по середину июля и с середины сентября по конец октября получена линейная зависимость вида $D_s = -a \cdot A_1 + b$ со среднеквадратической ошибкой равной 1,9 м и коэффициентом детерминации равным 0,82; для периода с середины июля по середину сентября – зависимость вида $D_s = c - d \cdot (f - A_1)^k$ со значением среднеквадратической ошибки равным 0,9 м и коэффициентом детерминации 0,66, где $a=9,42$ м $(\%)^{-1}$, $b=48,28$ м, $c=36,0$ м, $d=31,56$ м $(\%)^{-0,11}$, $f=6,0\%$ и $k=0,11$ – региональные регрессионные коэффициенты. Соотношение между измеренными и вычисленными значениями условной прозрачности дается на *рис. 1*. Указанное деление на периоды хорошо согласуется с повышением продукции фитопланктона с середины июля по середину сентября (Поповская, 2012; Kozhov, 1963), что, по всей видимости, и обуславливает существование различных связей условной прозрачности и альбедо водной поверхности в разные периоды.

Рис. 1. Соотношение между измеренными и вычисленными по данным AVHRR значениями условной прозрачности

Результаты

С использованием полученных зависимостей были составлены карты распределения условной прозрачности воды в поверхностном слое на всей акватории озера Байкал в период с июня по октябрь 1998–2015 гг. На рис. 2 и 3 для примера приведено распределение условной прозрачности воды в поверхностном слое озера Байкал по данным AVHRR в 2012 и 2013 гг., соответственно. Результаты спутниковых наблюдений показали, что прозрачность верхнего слоя воды в озере Байкал имеет ярко выраженную пространственно-временную изменчивость. В ходе изучения прозрачности за период с июня по октябрь в глубоководных районах озера наблюдается ярко выраженный максимум в июне – начале июля и минимум в конце июля – начале сентября, что хорошо согласуется с данными полевых исследований (Kozhov, 1963; Шерстянкин, 1974; Поповская и др., 2008), при этом считается, что указанный максимум прозрачности связан с интенсивным вертикальным перемешиванием поверхностных вод с прозрачными глубинными в период весенней гомотермии, а указанный минимум в первую очередь объясняется «цветением» фитопланктона. Согласно спутниковым данным, за период с июня по октябрь в 1998–2015 гг. прозрачность воды в поверхностном слое озера Байкал в целом изменялась от менее чем 0,1 м – в непосредственной близости от дельты реки Селенга, в заливах Провал и Посольский сор, что обусловлено выносом продуктов размыва берегов и ложа рекой Селенга, до 27,5 м – в глубоководных районах озера.

Рис. 2. Распределение условной прозрачности воды в поверхностном слое оз. Байкал по данным AVHRR в 2012 г.: А – 13 июня; Б – 1 июля; В – 28 июля; Г – 1 сентября; Д – 6 октября

Рис. 3. Распределение условной прозрачности воды в поверхностном слое оз. Байкал по данным AVHRR в 2013 г.: А – 10 июня; Б – 26 июня; В – 26 июля; Г – 31 августа; Д – 14 октября

Также изучен ход среднего значения условной прозрачности воды в поверхностном слое в некоторых районах озера (в проливе Малое море, в Чивыркуйском заливе, в Баргузинском заливе и в заливе Провал, *рис. 4*), отдельно в Южном, Центральном и Северном бассейнах и на всей акватории озера в целом (*рис. 5*). Ход прозрачности в указанных акваториях при наличии ярко выраженной внутригодовой изменчивости в общих чертах изменяется от года к году не столь существенно, и наибольшие отличия наблюдаются в конце июня – июле, что связано с более ранним или более поздним прогревом озера и, соответственно, с более ранним или более поздним началом «цветения» воды. Ход прозрачности в отдельных районах озера может существенно отличаться за счет их морфометрических особенностей, термического и динамического режима, характера пород, слагающих дно, перераспределения вод притоков и в зависимости от условий развития в различных районах планктона. Так, в мелководных заливах ход прозрачности характеризуется смещением ее минимума на сентябрь – октябрь (например, в заливе Провал), что, вероятно, происходит из-за дополнительного взмучивания воды в результате действия штормовых ветров.

Рис. 4. Ход средних значений условной прозрачности воды в поверхностном слое в проливе Малое море (А), в Чивыркуйском заливе (Б), в Баргузинском заливе (В) и в заливе Провал (Г)

По средним значениям условной прозрачности, определенным в ходе настоящего исследования, вода в поверхностном слое озера может быть классифицирована по классификации, приведенной Китаевым (Китаев, 1984). В целом за период исследования воду в поверхностном слое озера Байкал отличает очень высокая прозрачность и только во время

осенне-летнего минимума, с конца июля по середину сентября, воду в поверхностном слое озера в среднем характеризует высокая прозрачность. Аналогичная ситуация наблюдается отдельно в Южном, Центральном, Северном бассейнах озера, в Чивыркуйском и Баргузинском заливах и проливе Малое море. В заливе Провал, согласно указанной классификации, вода в поверхностном слое имеет высокую или очень высокую прозрачность в период с начала июня по конец июля, затем прозрачность падает до малой или очень малой.

Рис. 5. Ход средних значений условной прозрачности воды в поверхностном слое на всей акватории озера Байкал (А), Южного (Б), Центрального (В) и Северного (Г) бассейнов озера

По соотношению степени загрязнения воды с условной прозрачностью (Шитиков, Розенберг, Зинченко, 2003) вода в поверхностном слое озера Байкал в целом относится к очень чистой в течение всего анализируемого периода с июня по октябрь, однако в мелководных заливах, таких, как залив Провал, в сентябре – октябре в отдельные годы позволяет по величине условной прозрачности отнести воду в поверхностном слое к умеренно загрязненной, загрязненной или даже к грязной.

Заключение

В рамках настоящего исследования была разработана региональная методика определения условной прозрачности воды в поверхностном слое озера Байкал по данным

AVHRR на основании сопоставления массивов судовой и спутниковой информации с различием по времени спутниковых данных с соответствующими судовыми измерениями не более 200 минут. В результате были получены зависимости величины условной прозрачности от нормализованного альбеда 1 канала AVHRR: линейная зависимость для периода с начала июня по середину июля и с середины сентября по конец октября со среднеквадратической ошибкой равной 1,9 м и коэффициентом детерминации равным 0,82, нелинейная зависимость для периода с середины июля по середину сентября со значением среднеквадратической ошибки равным 0,9 м и коэффициентом детерминации 0,66.

Разработанная в ходе исследования региональная методика позволяет с удовлетворительной точностью давать оценку прозрачности воды в поверхностном слое озера Байкал по данным AVHRR. Полученные в ходе исследования данные о пространственно-временном распределении прозрачности хорошо согласуются с материалами судовых исследований (Kozhov, 1963; Шерстянкин, 1974; Поповская и др., 2008) и позволяют в свою очередь дополнять и уточнять имеющуюся информацию о прозрачности воды в озере, а также изучать внутригодовую и межгодовую изменчивость этой характеристики. В дальнейшем возможно применение данных о распределении условной прозрачности для изучения фронтов и динамических образований на поверхности озера Байкал, различимых в поле прозрачности.

Литература

1. Китаев С.П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.
2. Науменко М.А. Пространственное распределение и многолетние тренды прозрачности воды Ладожского озера. // Ладога. СПб.: Институт озераедения РАН, 2013. С. 217–223.
3. Неелова Л.О. Параметризация альбеда подстилающей поверхности в гидродинамических моделях атмосферной циркуляции. // Математика. Компьютер. Образование, 2007. Т. 2. С. 249–253.
4. Поповская Г.И., Усольцева М.В., Фирсова А.Д., Лихошвай Е.В. Оценка состояния весеннего фитопланктона озера Байкал в 2007 году. // География и природные ресурсы. 2008. № 1. С. 83–88.
5. Шамраев Ю. И., Шишкина Л. А. Океанология. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 386 с.
6. Шерстянкин П.П., Каплин В.М., Максимов В.Н. Вертикальное распределение прозрачности в подледный период на Байкале и ее связь с биологическими показателями. // Гидробиол. журнал, 1972. Т.8. № 4. С. 65–68.
7. Шерстянкин П.П. Пространственное распределение прозрачности в Малом море и его связь с динамикой вод. // Продуктивность Байкала и антропогенные изменения его природы. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1974. С. 54–62.
8. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.
9. Dev P.J., Shanmugam P. New model for subsurface irradiance reflectance in clear and turbid waters // Optics Express, 2014. Vol. 22, Issue 8. P. 9548–9566.
10. Kozhov M. Lake Baikal and its life. // Monographiae biologicae, 1963. Vol. XI. 344 p.
11. Physical basis of remote sensing (EMR interaction on ground: Water & Snow) [Электронный ресурс]: офиц. сайт программы усовершенствованного обучения техническим наукам. URL: <http://nptel.ac.in/courses/105104100/27> (дата обращения 30.10.2015).

Distribution of water transparency of Lake Baikal from AVHRR data

E.N. Sutyrina

Irkutsk State University, Irkutsk, 664003, Russia

E-mail: ensut78@gmail.com

The relation of water transparency with the content of suspensions and solutes of organic and inorganic genesis allows us to regard transparency as one of the most important physical parameters of water quality. The purpose of this study was to evaluate the characteristics of spatial and temporal distribution of water transparency of the surface layer of Lake Baikal using satellite remote sensing data. Remote sensing is an indispensable tool in the study of large inland water bodies including Lake Baikal with water area of 31.7 thousand sq. km. Regional techniques for determining relative water transparency of the surface layer of Lake Baikal with AVHRR data were developed by comparing arrays of ship and satellite data. A series of maps of water transparency of the surface layer of Lake Baikal for the period from June to October of different years was compiled using these regional algorithms. The variation of average transparency of surface layer water in some areas of the lake and throughout the whole water area was studied. Also, the main features of spatial and temporal distribution of water transparency of the surface layer of Lake Baikal during ice-free period were described.

Keywords: Lake Baikal, relative water transparency, AVHRR data, spatial and temporal distribution, regional technique

Accepted: 08.02.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-95-103

References

1. Kitaev S.P., *Jekologicheskie osnovy bioproduktivnosti ozer raznyh prirodnyh zon* (Ecological bases of bio-productivity of lakes of different natural zone), Moscow: Nauka, 1984, 207 p.
2. Naumenko M.A., Prostranstvennoe raspredelenie i mnogoletnie trendy prozrachnosti vody Ladozhskogo ozera (Spatial distribution and long-term trends in water clarity of Lake Ladoga), *Ladoga*, Saint-Petersburg: Institut ozerovedeniya RAN, 2013, pp. 217–223.
3. Neelova L.O., Parametrizacija al'bedo podstilajushhej poverhnosti v gidrodinamicheskikh modeljah atmosfernoj cirkuljacii (Parameterization of surface albedo in hydrodynamic models of atmospheric circulation), *Matematika. Komp'juter. Obrazovanie*, 2007, Vol. 2, pp. 249–253.
4. Popovskaja G.I., Usol'ceva M.V., Firsova A.D., Lihoshvaj E.V., Ocenka sostojanija vesennego fitoplanktona ozera Bajkal v 2007 godu (Assessment of the spring phytoplankton of Lake Baikal in 2007), *Geografija i prirodnye resursy*, 2008, No. 1, pp. 83–88.
5. Shamraev Ju.I., Shishkina L.A., *Okeanologija* (Oceanology), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980, 386 p.
6. Sherstjankin P.P., Kaplin V.M., Maksimov V.N., Vertikal'noe raspredelenie prozrachnosti v podlednyj period na Bajkale i ee svjaz' s biologicheskimi pokazateljami (Vertical distribution of transparency in the ice period on Lake Baikal and its relationship with biological indicators), *Gidrobiol. zhurnal*, 1972, Vol. 8, No. 4, pp. 65–68.
7. Sherstjankin P.P., Prostranstvennoe raspredelenie prozrachnosti v Malom more i ego svjaz' s dinamikoj vod (The spatial distribution of the transparency of the Maloe more and its relation to the dynamics of water.), *Produktivnost' Bajkala i antropogennye izmenenija ego prirody*, Irkutsk: Izd-vo IGU, 1974, pp. 54–62.
8. Shitikov V.K., Rozenberg G.S., Zinchenko T.D., *Kolichestvennaja gidrojekologija: metody sistemnoj identifikacii* (Quantitative hydroecology: system identification techniques), Tol'jatti: IJeVB RAN, 2003, 463 p.
9. Dev P.J., Shanmugam P., New model for subsurface irradiance reflectance in clear and turbid waters, *Optics Express*, 2014. Vol. 22, Issue 8, pp. 9548–9566.
10. Kozhov M. Lake Baikal and its life, *Monographiae biologicae*, 1963, Vol. XI, 344 p.
11. <http://nptel.ac.in/courses/105104100/27> (access 30.10.2015).