

Сутырина Е.Н.¹

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ AVHRR ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЗЕРА БАЙКАЛ

АННОТАЦИЯ

Связь прозрачности воды с содержанием в ней растворенных и взвешенных веществ органического и неорганического происхождения позволяет отнести прозрачность к важнейшим физическим показателям качества воды. Для изучения распределения прозрачности в оз. Байкал с площадью акватории порядка 31,7 тыс. км² дистанционное зондирование является незаменимым инструментом. Поэтому цель данного исследования состояла в оценке и картировании пространственно-временного распределения условной прозрачности воды в поверхностном слое оз. Байкал с использованием материалов дистанционного спутникового зондирования Земли. В рамках исследования на основании сопоставления массивов судовой и спутниковой информации были разработаны региональные методики определения величины условной прозрачности воды в поверхностном слое оз. Байкал по данным радиометра AVHRR. С использованием разработанных региональных алгоритмов были составлены серии картосхем распределения условной прозрачности в поверхностном слое оз. Байкал, согласно которым за период с июня по октябрь в 1998–2017 гг. прозрачность воды в поверхностном слое озера в целом изменялась от менее чем 0,1 м в непосредственной близости от дельты р. Селенги, в заливах Провал и Посольский сор до более чем 27,5 м в глубоководных районах озера. Также изучена внутригодовая и межгодовая изменчивость средних значений прозрачности воды в поверхностном слое в пределах отдельных лимнических районов и всей акватории озера в целом и дана оценка основных особенностей пространственно-временного распределения прозрачности в поверхностном слое оз. Байкал в безледоставный период.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оз. Байкал, условная прозрачность воды, дистанционное зондирование.

Ekaterina N. Sutyryna²

THE APPLICATION OF AVHRR DATA FOR THE STUDY OF HYDROOPTICAL CHARACTERISTICS OF LAKE BAIKAL

ABSTRACT

The relationship between the water transparency and the content of dissolved and suspended organic and inorganic substances in it allows to regard the transparency as the one of the most important physical parameters of the water quality. Remote sensing is an indispensable tool to study the distribution of transparency of Lake Baikal with the surface area of 31.7 thousand km². Therefore, the aim of this study was to evaluate and map the spatiotemporal distribution of relative water transparency of the surface layer of Lake Baikal using Earth remote sensing data. Regional methods of determining the relative water transparency of the surface layer

¹ Иркутский государственный университет, Географический факультет, ул. Карла Маркса, д. 1, 664003, Иркутск, Россия, e-mail: ensut78@gmail.com

² Irkutsk State University, Geographical faculty, Karl Marx str., 1, 664003, Irkutsk, Russia, e-mail: ensut78@gmail.com

of Lake Baikal with AVHRR data was developed by matching ship and satellite information. Using the regional algorithms, a series of maps of relative transparency of the surface layer of Lake Baikal were developed, according to which it was investigated that during the period from June to October in 1998–2017 the water transparency of the surface layer of the lake range from less than 0.1 m in the immediate vicinity of the Selenga River delta, in the Gulf of Proval and Posolsky Sor, to more than 27.5 m in the deep-water areas of the lake. Interannual and interannual variability of average values of water transparency of the surface layer within some lacustrine areas and the entire water area of the lake was examined and the major features of the spatiotemporal distribution of transparency of the surface layer of Baikal Lake during an ice-free period was also estimated.

KEYWORDS: Lake Baikal, relative water transparency, remote sensing.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях меняющегося климата и возрастающего антропогенного воздействия на внутренние водоемы, в том числе в результате увеличения рекреационной нагрузки, актуальной становится проблема дистанционного контроля состояния данных водных объектов. Мониторинг и изучение экологически значимых гидрооптических характеристик водоемов, включая прозрачность воды, является одним из важных направлений региональной лимнологии [Суторихин и др., 2013]. Связь прозрачности с содержанием в воде взвешенных и растворенных веществ органического и неорганического происхождения относит прозрачность к важнейшим физическим показателям качества воды и позволяет использовать ее измерения для типизации озер и отдельных лимнических районов, идентификации водных масс различного генезиса, для косвенного метода анализа динамики вод и т. д. [Шерстянкин, 1974]. Для изучения особенностей распределения прозрачности в поверхностном слое оз. Байкал, имеющего значительные размеры акватории в 31,7 тыс. км² [Troitskaya et al., 2015], привлечение данных дистанционного зондирования дает возможность следить за состоянием всего водоема, получать пространственно-временную информацию о лимнических процессах и изучать озеро как целостный географический объект, что сложно обеспечить с применением только судовых наблюдений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках данного исследования для оценки прозрачности воды в поверхностном слое оз. Байкал и изучения особенностей ее пространственно-временного распределения были использованы данные радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) с 1998 по 2017 г. за безледоставный период.

Радиометр AVHRR установлен на борту метеорологических спутников серии NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) с околополярной орбитой. Линейный размер элемента разрешения на местности радиометра AVHRR составляет около 1,1 км в надире. Полоса обзора радиометра AVHRR в 2600 км позволяет просматривать всю акваторию оз. Байкал за один пролет.

На участке электромагнитного спектра 0,59–0,69 мкм, который соответствует 1 каналу радиометра AVHRR, спектральное альbedo чистой воды низкое (рис. 1). Однако при уменьшении прозрачности как за счет увеличения содержания взвешенных веществ, так и при «цветении» водоема, в указанном выше диапазоне наблюдается повышение спектрального альbedo [Dev, Shanmugam, 2014], что дает предпосылку для восстановления величины условной прозрачности по данным 1 канала AVHRR.

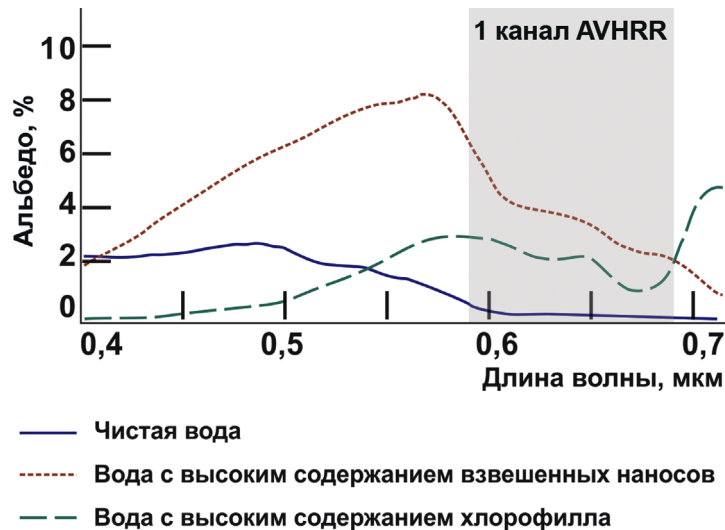


Рис. 1. Спектральное альbedo чистой воды и воды с высоким содержанием хлорофилла или взвешенных наносов согласно [Dev, Shanmugam, 2014]

Fig. 1. Spectral albedo of pure water and water with a high chlorophyll content or suspended sediment according to [Dev, Shanmugam, 2014]

В ходе исследования на основании сопоставления массивов судовой и спутниковой информации были разработаны региональные методики оценки условной прозрачности воды в поверхностном слое оз. Байкал по данным радиометра AVHRR, с различием по времени спутниковых данных с соответствующими судовыми измерениями не более 200 минут. Для учета существенного вклада в величину спектрального альbedo высоты солнца в работе использовались значения нормализованного альbedo 1 канала AVHRR для дальнейшего сопоставления с судовыми измерениями условной прозрачности. Влияние облачности уменьшено отбором снимков с низким содержанием облачности в районе оз. Байкал, фильтрацией облачности, а также расчетом минимальных значений нормализованного альbedo по всем доступным снимкам, попадающим в 200-минутный интервал времени между спутниковыми и судовыми съемками. Кроме уменьшения помех от полупрозрачной облачности расчет минимального альbedo позволяет снизить влияние волнения на величину альbedo. Также при волнении изменяется не только альbedo поверхности, но и сама величина условной прозрачности [Шамраев, Шишкина, 1980], что уменьшает вклад данного фактора в ошибку при оценке условной прозрачности.

В результате были получены зависимости величины условной прозрачности D_s , м, от нормализованного альbedo 1 канала AVHRR A_1 , % (рис. 2):

– для периода с начала июня по середину июля и с середины сентября по конец октября зависимость линейного вида –

$$D_s = -a_s A_1 + b_s \quad (1)$$

со среднеквадратической ошибкой, равной 1,9 м, и коэффициентом детерминации, равным 0,82,

– для периода с середины июля по середину сентября зависимость вида –

$$D_s = c_s - d_s (f_s - A_1)^k \quad (2)$$

со значением среднеквадратической ошибки, равным 0,9 м, и коэффициентом детерминации 0,66, где a_s , b_s , c_s , d_s , f_s и k – региональные регрессионные коэффициенты.

Наличие двух зависимостей объясняется более выраженным «цветением» водоема с середины июля по середину сентября.

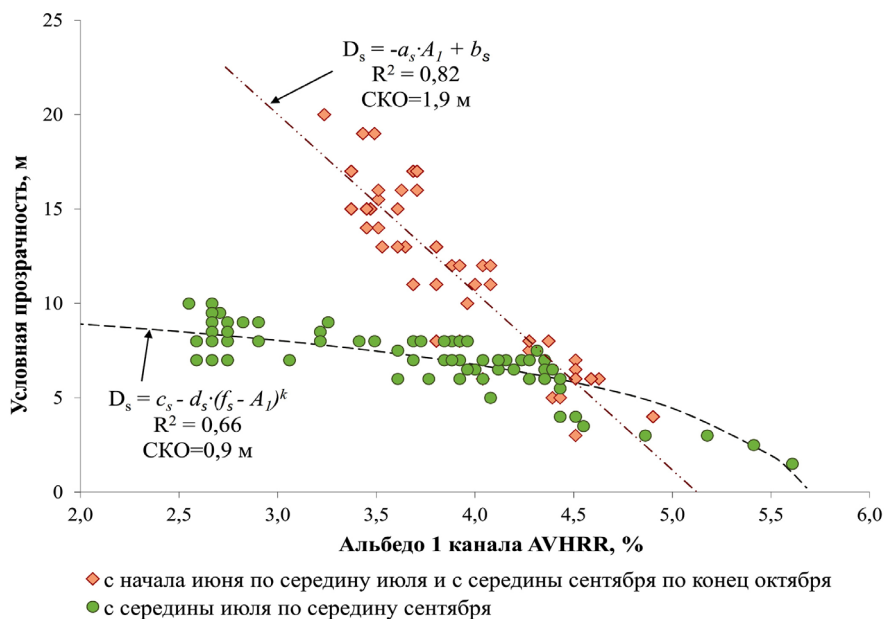


Рис. 2. Зависимости значения условной прозрачности от величины нормализованного альbedo 1 канала радиометра AVHRR
 Fig. 2. Relationships between of the magnitude of relative transparency and the value of the normalized albedo of AVHRR band 1

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С использованием данных зависимостей были составлены картосхемы распределения условной прозрачности в поверхностном слое оз. Байкал в период с июня по октябрь 1998–2017 гг. Примеры картосхем распределения прозрачности за отдельные годы приведены на рис. 3.

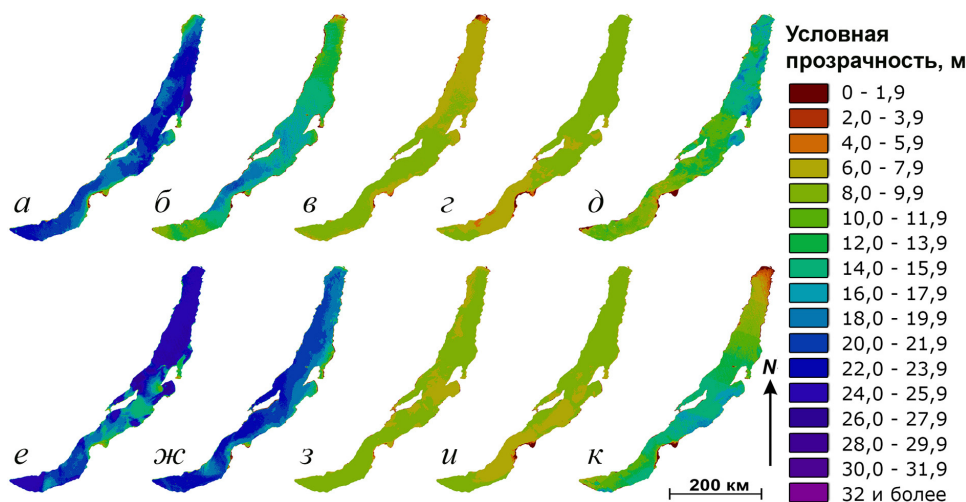


Рис. 3. Распределение условной прозрачности воды в поверхностном слое оз. Байкал по данным AVHRR в 2012 г.:

а – 13 июня; б – 1 июля; в – 28 июля; г – 1 сентября; д – 6 октября и 2013 г.: е – 10 июня; ж – 26 июня; з – 26 июля; и – 31 августа; к – 14 октября

Fig. 3. The distribution of relative water transparency of the surface layer of Lake Baikal according to AVHRR data in 2012:

а – June 13; б – July 1; в – July 28; г – September 1; д – October 6 and in 2013: е – June 10; ж – June 26; з – July 26; и – August 31; к – October 14

Результаты спутниковых измерений показали, что прозрачность поверхностного слоя воды в оз. Байкал имеет существенную пространственно-временную изменчивость и в ходе прозрачности за период с июня по октябрь в глубоководных районах озера наблюдается хорошо заметный максимум в июне – начале июля, который связан с интенсивным вертикальным перемешиванием во время весенней гомотермии [Шерстянкин, 1987; Поповская и др., 2008]. В конце июля – начале сентября по данным спутникового мониторинга наблюдается выраженный минимум прозрачности, который объясняется «цветением» фитопланктона. Согласно составленным картам, за период с июня по октябрь в 1998–2017 гг. условная прозрачность воды в поверхностном слое оз. Байкал изменялась от менее чем 0,1 м в непосредственной близости от дельты р. Селенги, в заливах Провал и Посольский сор, до 27,5 м в глубоководных районах водоема.

В работе также определены значения и изучен ход средней величины условной прозрачности воды в поверхностном слое некоторых лимнических районов и оз. Байкал в целом (рис. 4). Ход прозрачности в приведенных на рис. 4 акваториях при наличии заметной внутригодовой изменчивости изменяется от года к году не так существенно, и наибольшие межгодовые 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.

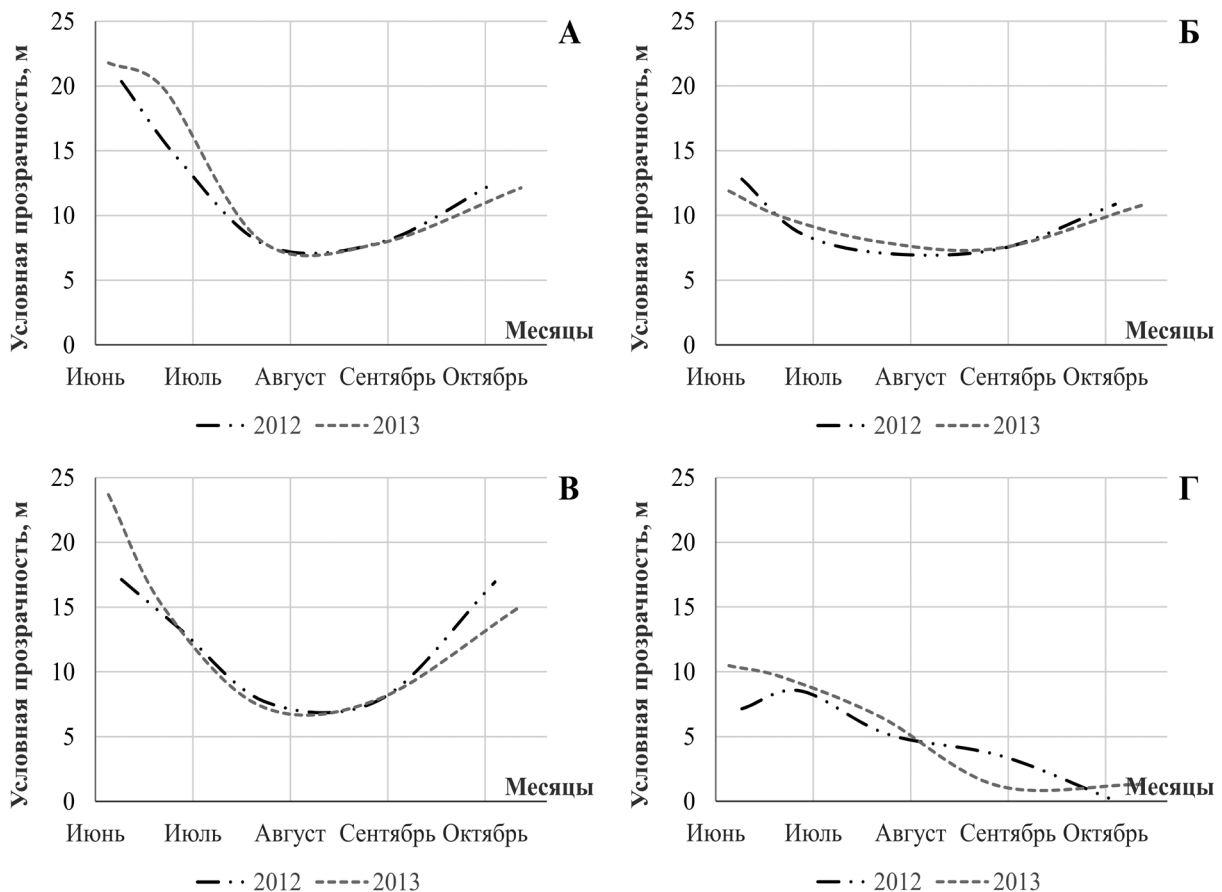


Рис. 4. Ход средних значений условной прозрачности воды на поверхности на поверхности всей акватории оз. Байкал (А), в Чивыркуйском заливе (Б), в Баргузинском заливе (В) и в заливе Провал (Г)

Fig. 4. Relationships between of the magnitude of relative transparency and the value of the normalized albedo of AVHRR band 1

В отдельных лимнических районах ход прозрачности может существенно отличаться за счет их морфометрических условий, слагающих дно пород, термического и динамического режима, перераспределения вод притоков, а также в зависимости от характера развития в различных районах планктона. Так в мелководных заливах, например, в заливе Провал, ход прозрачности характеризуется смещением ее минимума на сентябрь-октябрь, что, вероятно, происходит из-за дополнительного взмучивания воды в результате действия штормовых ветров в данное время года. Согласно классификации [Китаев, 1984], в целом за период исследования воду в поверхностном слое оз. 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 в Чивыркуйском и Баргузинском заливах. 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.

По соотношению степени загрязнения воды с условной прозрачностью [Шитиков и др., 2003] вода в поверхностном слое оз. 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.

ВЫВОДЫ

Разработанные в рамках исследования региональные методики дают возможность с удовлетворительной точностью оценивать и картировать условную прозрачность воды в поверхностном слое оз. Байкал по данным AVHRR. Данные о пространственно-временном распределении прозрачности в озере, полученные в результате исследования, хорошо согласуются с материалами судовых измерений [Шерстянкин, 1987; Поповская и др., 2008] и в свою очередь позволяют дополнять и уточнять имеющуюся информацию о поле условной прозрачности воды в поверхностном слое озера, а также изучать внутригодовую и межгодовую изменчивость этой характеристики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект № 17-29-05045.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, No 17-29-05045.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Китаев С.П.* Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.
2. *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.
3. *Суторихин И.А., Букатый В.И., Акулова О.Б.* Динамика гидрооптических характеристик разнотипных озер Алтайского края // Известия АлтГУ. 2013. № 1–1 (77). С. 178–183.
4. *Шамраев Ю.И., Шишкина Л.А.* Океанология. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 386 с.
5. *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.

6. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.
7. Dev P.J., Shanmugam P. New model for subsurface irradiance reflectance in clear and turbid waters // *Optics Express*. 2014. V. 22, issue 8. P. 9548–9566.
8. Troitskaya E., Blinov V., Ivanov V., Zhdanov A., Gnatovsky R., Sutyryna E., Shimaraev M. Cyclonic circulation and upwelling in Lake Baikal // *Aquatic Sciences*. 2015. V. 77, issue 2. P. 171–182. DOI: 10.1007/s00027-014-0361-8.

REFERENCES

1. Dev P.J., Shanmugam P. New model for subsurface irradiance reflectance in clear and turbid waters. *Optics Express*. 2014. V. 22, Issue 8. P. 9548–9566.
2. Kitaev S.P. Ecological bases of bioproductivity of lakes of different natural zones. M.: Nauka, 1984. 207 p. (in Russian).
3. Popovskaya G.I., Usoltseva M.V., Firsova A.D., Likhoshvay E.V. Assessment of the state of spring phytoplankton of Lake Baikal in 2007. *Geography and Natural Resources*. 2008. No 1. P. 83–88 (in Russian).
4. Shamraev Yu.I., Shishkina L.A. *Oceanology*. L.: Gidrometeoizdat, 1980. 386 p. (in Russian).
5. Sherstyankin P.P. Spatial distribution of transparency in the Small Sea and its relationship with water dynamics. *Produktivnost' Bajkala i antropogennye izmeneniya ego prirody*. Irkutsk: ISU, 1974. P. 54–62 (in Russian).
6. Shitikov V.K., Rosenberg G.S., Zinchenko T.D. Quantitative hydroecology: methods of system identification. Togliatti: IEVB RAS, 2003. 463 p. (in Russian).
7. Sutorikhin I.A., Bukaty V.I., Akulova O.B. Dynamics of hydro-optical characteristics of different types of lakes in the Altai Territory. *Izvestija Altajskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2013. No 1–1 (77). P. 178–183 (in Russian).
8. Troitskaya E., Blinov V., Ivanov V., Zhdanov A., Gnatovsky R., Sutyryna E., Shimaraev M. Cyclonic circulation and upwelling in Lake Baikal. *Aquatic Sciences*. 2015. V. 77, issue 2. P. 171–182. DOI: 10.1007/s00027-014-0361-8.