

УДК 556.551:528.88(282.256.341)

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОЗРАЧНОСТИ ВОДЫ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Сутырина Е.Н.

ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет», Иркутск, e-mail: ensut78@gmail.com

Прозрачность входит в число важнейших физических показателей качества воды, так как она зависит от содержания растворенных и взвешенных в воде частиц органического и неорганического генезиса. Во внутренних водоемах в качестве характеристики условной прозрачности воды может выступать глубина погружения диска Секки до полного исчезновения из вида. При изучении оз. Байкал с площадью акватории в 31 722 км² необходимым инструментом для оценки величины условной прозрачности воды в пределах всего водного объекта могут служить спутниковые наблюдения. Автором на основании совместного анализа массивов квазисинхронных спутниковых и судовых материалов получены региональные алгоритмы для оценки условной прозрачности в поверхностном слое воды оз. Байкал по материалам, принимаемым прибором AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Разработан линейный алгоритм с величиной средней квадратической ошибки в 1,9 м для периодов с начала июня до середины июля и с середины сентября по конец октября. Для периода с середины июля по середину сентября предложен нелинейный алгоритм, имеющий ошибку порядка 0,9 м. Составлена серия карт распределения прозрачности воды в поверхностном слое оз. Байкал в безледный период в разные годы на основе применения разработанных авторских алгоритмов. Проанализирована сезонная и межгодовая изменчивость условной прозрачности воды в ряде лимнических районов оз. Байкал. Изучена связь условной прозрачности воды в поверхностном слое водоема с температурой воды на поверхности оз. Байкал.

Ключевые слова: озеро Байкал, прозрачность воды, дистанционное зондирование, данные AVHRR, региональный алгоритм

RETRIEVAL OF WATER TRANSPARENCY IN THE SURFACE LAYER OF LAKE BAIKAL FROM REMOTE SENSING DATA

Sutyryna E.N.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Irkutsk State University», Irkutsk, e-mail: ensut78@gmail.com

Water transparency is one of the most important physical indicators of the water clarity, since water transparency depends on the amount of suspended and dissolved substances of bio-logical and inorganic origins in water. The Secchi disk depth is a measure of water transparency. When studying Lake Baikal with the surface area of 31,722 sq. km, remote sensing is a necessary tool to assess water transparency within the entire lake. To develop regional algorithms for estimating the water transparency in Lake Baikal is based on the use of a set of coincident AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) data and in situ water transparency measurements. Because of research, the linear retrieval algorithm for the periods from the beginning of June to middle of July and from mid-September to the end of October and the nonlinear algorithm for the period from mid-July to mid-September with the root-mean-square error of 1.9 and 0.9 meters respectively were developed. A series of maps of the distribution of water transparency in Lake Baikal for the ice-free period of different years was created using the AVHRR-based regional algorithms. The seasonal and interannual variability of water transparency in a number of lacustrine regions of Lake Baikal was evaluated. The relationship of transparency with the temperature of the water in the lake was studied.

Keywords: Lake Baikal, water transparency, remote sensing, AVHRR data, regional algorithm

Озеро Байкал расположено в Байкальской рифтовой зоне в южной части Восточной Сибири в России вблизи от российско-монгольской границы. Байкал был объявлен объектом Всемирного наследия ЮНЕСКО в 1996 г.. Озеро Байкал с объемом в 23 615 км³ и площадью поверхности в 31 722 км² является крупнейшим по объему и старейшим из существующих пресноводных озер в мире [1].

Озеро Байкал обладает существенными размерами, поэтому весьма затруднительно изучать данный внутренний водоем, как цельный объект, располагая только материа-

лами точечных стационарных и судовых наблюдений. Эта проблема может быть решена с внедрением средств и методов дистанционного спутникового зондирования Земли, которое дает возможность получать ряды пространственно-временной информации о протекающих в озере процессах и явлениях и контролировать состояние всего озера.

В условиях меняющегося климата и усиления антропогенной нагрузки на оз. Байкал, в том числе за счет туристической деятельности, возникает необходимость в дистанционном контроле экологически значимых параметров данного водоема.

Актуальной задачей региональных лимнологических и экологических исследований является оценка гидрооптических характеристик внутренних водоемов [2]. Прозрачность воды, в качестве меры которой может выступать глубина погружения диска Секки до полного исчезновения из вида, или условная прозрачность, является одним из ключевых физических показателей качества воды и экологического состояния водоемов.

Это обусловлено тем, что прозрачность зависит от количества оптически активных взвешенных и растворенных в воде веществ неорганического и органического происхождения. «Цветение» воды часто оказывает доминирующее влияние на снижение прозрачности воды в озере [3]. Таким образом, прозрачность, с одной стороны, отражает трофическое состояние водоема и влияние изменения климата на озерную экосистему, с другой, изменение прозрачности может само оказывать влияние на количество солнечной радиации, поглощаемой поверхностными водами, и на термическую стратификацию озера, а также вести к изменениям в продуктивности и биоразнообразии озерных экосистем [3]. Отмеченные выше факторы делают прозрачность воды важным индикатором для обнаружения и мониторинга реакции водной экосистемы на естественные и антропогенные изменения окружающей среды.

В связи со сказанным выше, целью исследования является разработка региональных алгоритмов оценки условной прозрачности в поверхностном слое воды в оз. Байкал по материалам спутниковых наблюдений.

Материалы и методы исследования

Для оценки прозрачности использованы материалы, полученные приборами AVHRR в 1998–2018 гг. Приборы AVHRR функционируют на борту метеорологических спутников серий NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) и MetOp (Meteorological Operational satellite), работающих на околополярных солнечно-синхронных орбитах. Прибор AVHRR – это сканер, который обеспечивает зондирование в видимой, ближней инфракрасной, коротковолновой инфракрасной и тепловой инфракрасной полосах электромагнитного спектра с пространственным разрешением 1,1 км в надире.

На альbedo водной поверхности в видимой области спектра существенное влия-

ние оказывает состав, концентрация и размер оптически активных органических и неорганических веществ, растворенных и взвешенных в воде, которые также обуславливают и величину прозрачности воды. На рис. 1 приведены кривые спектрального альbedo чистой и мутной воды, положение которых значительно различается в видимом диапазоне спектра.

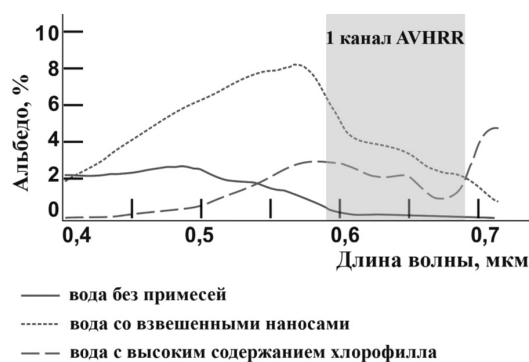


Рис. 1. Кривые спектрального альbedo чистой и мутной воды согласно [4]

В спектральной полосе 0,59–0,69 мкм 1 канала радиометра AVHRR альbedo чистой воды принимает низкие значения (рис. 1). При снижении прозрачности за счет повышения содержания в воде взвешенных наносов и/или хлорофилла происходит увеличение величины альbedo 1 канала AVHRR (рис. 1). В рамках исследования автором разработаны региональные алгоритмы для оценки величины условной прозрачности в поверхностном слое воды оз. Байкал по материалам, полученным прибором AVHRR. Для этого сопоставлены массивы спутниковых и судовых данных, включающие по 138 точек квазисинхронных наблюдений, имеющих разницу во времени соответствующих судовых и спутниковых измерений не более 200 мин.

Чтобы нивелировать существенное влияние высоты солнца над горизонтом на величину отражения, при сопоставлении с судовыми замерами условной прозрачности в работе применялись значения нормализованного альbedo 1 канала AVHRR. Снижение влияния облачности и волнения достигалось в работе посредством выбора спутниковых снимков с низким содержанием облачности, а также процедурами фильтрации облачности и посредством вычисления минимальных значений нормализованного альbedo 1 канала AVHRR по всем

спутниковым изображениям, попадающим в 200-минутный промежуток времени между судовыми и спутниковыми измерениями. Кроме этого, при волнении изменяется не только величина спектрального альbedo поверхности, но и значение условной прозрачности [5], что уменьшает влияние этого фактора на точность оценки прозрачности по значению альbedo.

В итоге совместного анализа спутниковой и судовой информации установлены связи между условной прозрачностью D_s , м, и нормализованным альbedo 1 канала AVHRR A_1 , % (рис. 2).

Разработан линейный алгоритм с величиной коэффициента детерминации 0,82 и средней квадратической ошибки (СКО) в 1,9 м для временного интервала с начала июня до середины июля и с середины сентября по конец октября:

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

Для временного интервала с середины июля по середину сентября предложен нелинейный алгоритм, имеющий коэффициентом детерминации 0,66 и СКО порядка 0,9 м:

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

где a_s, b_s, c_s, d_s, f_s и k – региональные регрессионные коэффициенты.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате исследования на основе разработанных автором алгоритмов составлены карты распределения условной про-

зрачности в поверхностном слое оз. Байкал в безледный период 1998–2018 гг. Примеры карт для отдельных лет показаны на рис. 3.

По результатам спутниковых наблюдений прозрачность в поверхностном слое оз. Байкал имеет заметную изменчивость как во времени, так и в пространстве. В безледный период выраженный максимум прозрачности воды наблюдается в глубоководных районах озера с июня по начало июля. Существует мнение, что это может объясняться интенсивным вертикальным перемешиванием в период весенней гомотермии [6].

Наименьшие значения прозрачности по материалам спутниковых наблюдений регистрируются с конца июля по начало сентября и ассоциируется с «цветением» воды в это время. За период с июня по октябрь в 1998–2018 гг. зарегистрированные значения условной прозрачности в поверхностном слое воды оз. Байкал варьировали от 27,5 м – в глубоководных районах озера, до 0,1 м и менее – вблизи от дельты реки Селенги, в заливах Посольский сор и Провал.

По спутниковым наблюдениям наибольшая амплитуда колебаний условной прозрачности в безледный период зарегистрирована в глубоководных районах озера и составила более 19 м. На мелководных участках акватории, глубина которых не превосходит 20 м (например, в заливах Посольский сор, Провал и Чивыркуйском), зарегистрирована намного меньшая амплитуда колебаний величины прозрачности воды за безледный период, которая в отдельных местах имеет значение менее 3,5 м.

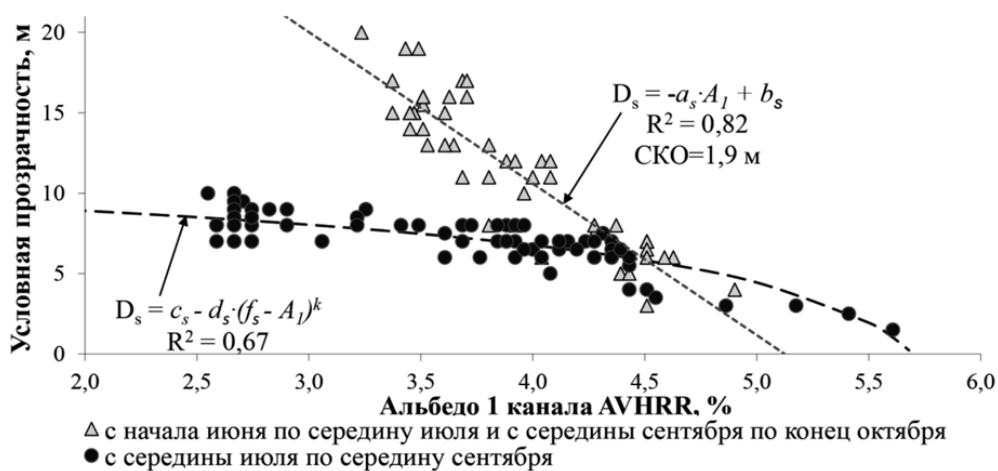


Рис. 2. Связи значений условной прозрачности и нормализованного альbedo 1 канала AVHRR

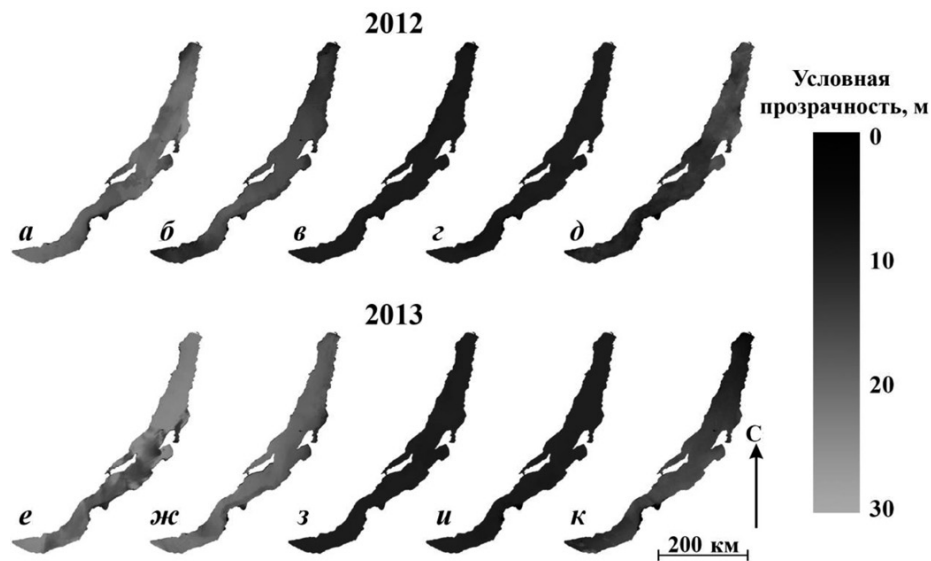


Рис. 3. Спутниковые карты условной прозрачности в поверхностном слое оз. Байкал по материалам AVHRR в 2012 г.: а – 13.06; б – 01.07; в – 28.07; г – 01.09; д – 06.10 и 2013 г.: е – 10.06; ж – 26.06; з – 26.07; и – 31.08; к – 14.10

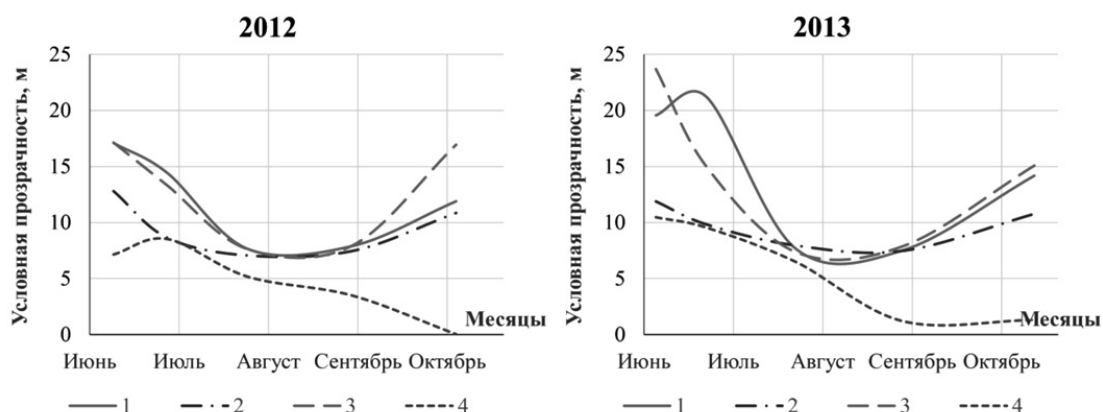


Рис. 4. Изменчивость значений условной прозрачности в поверхностном слое, осредненных по акватории пролива Малое Море (1), Чивыркуйского залива (2), Баргузинского залива (3), залива Провал (4)

Сезонная изменчивость прозрачности в разных лимнических районах существенно различается из-за особенностей их подводного рельефа, термодинамических условий, притока речных вод и т.д. В работе изучены сезонные колебания значений условной прозрачности, осредненных в пределах акваторий некоторых лимнических районов, в ряде лет в безледный период (рис. 4). В проливе Малое Море, в Чивыркуйском и в Баргузинском заливах регистрируется ярко выражен-

ная сезонная изменчивость прозрачности: с наибольшим значением в июне – начале июля и наименьшим – в конце июля – начале сентября, как у озера в целом. В некоторых мелководных заливах (например, в заливах Провал и Посольский сор) в сезонных колебаниях прозрачности воды отмечается сдвиг наименьшего значения на сентябрь-октябрь, что может быть ассоциировано с добавочным перемешиванием воды в результате действия штормовых ветров.

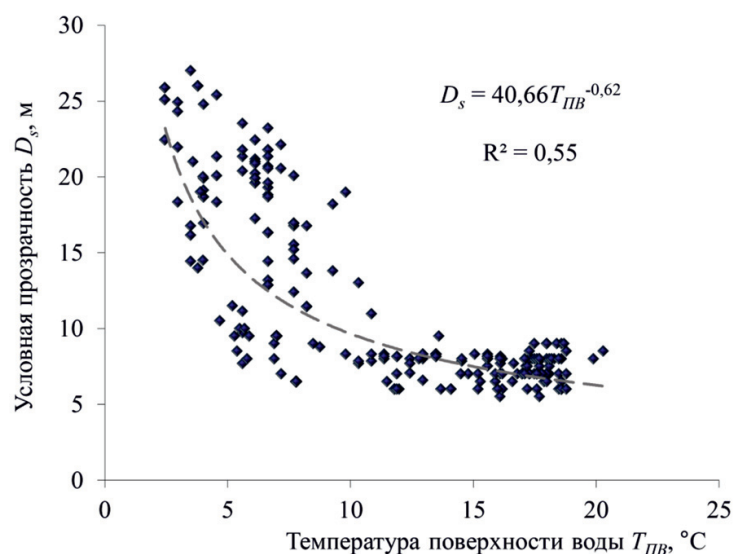


Рис. 5. Связь температуры поверхности воды и условной прозрачности в открытой части оз. Байкал в безледный период

Межгодовые колебания прозрачности воды наиболее заметны с конца июня по июль и связаны со сдвигом сроков прогрева озера в разные годы и, соответственно, сдвигом в межгодовом разрезе начала «цветения» воды.

Вода в поверхностном слое оз. Байкал с июня по октябрь в 1998–2018 гг. по соотношению условной прозрачности со степенью загрязнения [7] в целом является очень чистой. Вместе с этим в таких мелководных заливах, как Провал и Посольский сор, в сентябре и октябре в ряде лет по величине условной прозрачности вода относится к умеренно загрязненной, загрязненной, а иногда даже к грязной.

По спутниковым материалам о распределении температуры поверхности воды в озере [8] и распределении прозрачности для открытой части озера выявлено существование тесной степенной связи между прозрачностью и температурой воды в безледный период с коэффициентом детерминации 0,55 (рис. 5).

Выявление подобной степенной связи с отрицательным показателем степени объясняется закономерным уменьшением прозрачности в результате роста фитопланктона при увеличении температуры поверхности и имеет исключительно важное значение в условиях современных климатических изменений и понимания широкого диапазона их последствий.

Заключение

Автором на основании совместного анализа массивов квазисинхронных спутниковых и судовых материалов предложены региональные алгоритмы для восстановления условной прозрачности в поверхностном слое воды оз. Байкал по спутниковым снимкам прибора AVHRR. Разработанные алгоритмы имеют приемлемую для большинства лимнологических исследований точность. Данные о прозрачности воды в озере, полученные с применением региональных алгоритмов, не противоречат материалам контактных измерений указанной величины с применением диска Секки [6]. Кроме того, спутниковые данные дают возможность исследовать межгодовые и сезонные колебания прозрачности воды, а также уточнять и дополнять имеющуюся точечную судовую и станционную информацию об этой характеристике. Также спутниковая информация о прозрачности в озере является в своем роде уникальным и незаменимым источником для восстановления пространственной структуры распределения условной прозрачности в водоеме, так как пространственная интерполяция точечных судовых изменений прозрачности часто не дает удовлетворительного результата ввиду сложности паттерна данной характеристики в Байкале [9]. Поэтому внедрение

таких методов, как дистанционное зондирование, помогает улучшить детализацию при восстановлении полей прозрачности воды в оз. Байкал и выявлять негативные изменения в экологически значимых факторах окружающей среды, которые могут угрожать многочисленным эндемичным обитателям экосистем озера.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 17-29-05045, № 12-05-31100.

Список литературы / References

1. Troitskaya E., Blinov V., Ivanov V., Zhdanov A., Gnatsky R., Sutyryna E., Shimaraev M. Cyclonic circulation and upwelling in Lake Baikal. *Aquatic Sciences*. 2015. vol. 77 (2). P. 171–182. DOI: 10.1007/s00027-014-0361-8.
2. Суторихин И.А., Букатый В.И., Акулова О.Б. Динамика гидрооптических характеристик разнотипных озер Алтайского края // *Известия Алтайского государственного университета*. 2013. № 1–1 (77). С. 178–183.
3. Sutorikhin I.A., Bukaty V.I., Akulova O.B. Dynamics of hydro-optical characteristics of various lakes of the Altai Territory // *Izvestija Altajskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2013. № 1–1 (77). P. 178–183 (in Russian).
4. Kulshreshtha A., Shanmugam P. Estimation of Secchi Transparency in Turbid Coastal Waters. *Aquatic Procedia*. 2015. vol. 4. P. 1114–1118. DOI: 10.1016/j.aqpro.2015.02.141.
5. Dev P.J., Shanmugam P. New model for subsurface irradiance reflectance in clear and turbid waters. *Optics Express*. 2014. vol. 22 (8). P. 9548–9566. DOI: 10.1364/OE.22.009548.
6. Шамраев Ю.И., Шишкина Л.А. *Океанология*. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 386 с.
7. Shamraev Ju.I., Shishkina L.A. *Oceanology*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980. 386 p. (in Russian).
8. Поповская Г.И. Удивительный мир водорослей Байкала // *Наука в Сибири*. 2012. № 30–31. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nsc.ru/HBC/article.phtml?nid=644&id=18> (дата обращения: 18.11.2019).
9. Popovskaja G.I. The amazing world of Baikal algae // *Nauka v Sibiri*. 2012. № 30–31. [Electronic resource]. URL: <http://www.nsc.ru/HBC/article.phtml?nid=644&id=18> (date of access: 18.11.2019) (in Russian).
10. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.
11. Shitikov V.K., Rozenberg G.S., Zinchenko T.D. Quantitative hydroecology: systems identification methods. Tolyatti: IEVB RAN, 2003. 463 p. (in Russian).
12. Сутырина Е.Н. Использование данных дистанционного спутникового зондирования для картографического отображения и анализа распределения температуры поверхности воды озера Байкал // *Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле»*. 2012. Т. 5. № 2. С. 240–251.
13. Sutyryna E.N. Using satellite remote sensing data for mapping and analysis of the distribution of the surface temperature of the water of Lake Baikal // *Izvestija Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija «Nauki o Zemle»*. 2012. V. 5. № 2. P. 240–251 (in Russian).
14. Izmesteva L.R., Pislegina E.V., Krashchuk L.S., Shimaraeva S.V., Zilov E.A., Moore M.V., Hampton S.E., Woo K.H., Ferwerda C.J., Gray D.K. Lake-Wide Physical and Biological Trends Associated with Warming in Lake Baikal. *Journal of Great Lakes Research*. 2016. vol. 42 (1). P. 6–17. DOI: 10.1016/j.jglr.2015.11.006.