

Положим  $\Psi = \frac{e^{-ik_1 r_1}}{r_1}$ , и в качестве  $\bar{E}$  в соответствии с (3) и (5) принимаем

$$\bar{E} = \bar{E}_0 e^{-ik_1 r_1} \alpha(\beta) \left\{ \left[ e^{-2ik_2 r_2} T_{1,2}(\beta) T_{2,1}(\beta) + e^{-2ik_1 r_1} V_{1,2}^2(\beta) \right] \right\}, \quad \bar{H} = \frac{1}{\omega \mu_1} [\bar{K}_1 \bar{E}]$$

и подставляя в (6) и (7), и учитывая, что диаграмма направленности узкая, интегрирование проводим приближенно, затем определяем мощность поля, поступающего в радиометр:

$$P = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[ \bar{E}(P) \bar{H}^*(P) \right]$$

Интегральная светимость Земли равна

$$P_{uc} = \int_0^\infty r(\omega) P d\omega \quad (8)$$

где  $r(\omega) = \frac{\omega}{c^2 \pi} \frac{h\omega}{e^{kT} - 1}$  – формула Планка. В приближении Релея–Джинса

$$r(\omega) \cong \frac{2kT}{\lambda^2},$$

поэтому (8) есть

$$P_{uc} = \frac{2k}{4\pi^2 c^2} T_{ря},$$

$$T_{ря}^{\parallel\perp} = T_0 \int_0^\infty \omega^2 \sigma^{\parallel\perp}(\varphi) \sigma^{\parallel\perp}(\varphi)^* d\omega,$$

где  $T_{ря}$  – так называемая радиояркостная температура, если полоса пропускания прибора  $\Delta\omega$ , то

$$T_{ря}^{\parallel\perp} = \int_\omega^{\omega+\Delta\omega} \omega^2 \sigma^{\parallel\perp}(\varphi) \sigma^{\parallel\perp}(\varphi)^* d\omega$$

и  $\sigma(\varphi)$  – коэффициент обратного рассеяния:

$$\sigma^{\parallel\perp}(\varphi) = \alpha^{\parallel\perp}(\varphi) \left\{ \left[ 1 - V_{1,2}^{\parallel\perp}(\varphi) \right] e^{-2ik_2 r_2} + V_{1,2}^{\parallel\perp}(\varphi) e^{-2ik_1 r_1} \right\} \Phi^{\parallel\perp}(\varphi), \quad (9)$$

$$\alpha^{\parallel\perp}(\varphi) = 1 + \frac{GF^{\parallel\perp}(\varphi) V_{1,2}^{\parallel\perp}(0)}{\left[ 1 - V_{1,2}^{\parallel\perp}(0) \right] e^{-2ik_2 h_2} + V_{1,2}^{\parallel\perp}(0) e^{-2ik_1 h_1}},$$

$$\Phi^{\parallel\perp}(\varphi) = \begin{cases} \cos^2 \varphi & \text{при } TE \text{ – поляризации ("⊥"),} \\ \cos \varphi \sqrt{(1 + \sin^2 \varphi)^2 + \frac{1}{4} \sin^2 2\varphi} & \\ \text{при } TM \text{ – поляризации ("||").} \end{cases}$$

$$V_{1,2}^{\parallel}(\varphi) = \frac{Z_1^{\parallel} \cos \varphi - Z_2^{\parallel} \cos \theta}{Z_1^{\parallel} \cos \varphi + Z_2^{\parallel} \cos \theta}, \quad Z_1^{\parallel} = \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}}, Z_2^{\parallel} = \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}},$$

$$V_{1,2}^{\perp}(\varphi) = \frac{Z_1^{\perp} \cos \varphi - Z_2^{\perp} \cos \theta}{Z_1^{\perp} \cos \varphi + Z_2^{\perp} \cos \theta}, \quad Z_1^{\perp} = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}}, Z_2^{\perp} = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\mu_2}},$$

Параметры  $h_1$  и  $h_2$  определяются из уравнений баланса энергии в первой и второй средах, и означают границы излучающих объемов в средах:

$$h_1 \approx \frac{1}{\operatorname{Im} k_1}, h_2 \approx \frac{1}{\operatorname{Im} k_2}.$$

Формулу (9) можно обобщить на случай неровной поверхности путем умножения коэффициентов Френеля на  $\exp[-2k_1^2 \Delta^2 \cos^2 \varphi]$ , где  $\Delta$  – СКО неровностей.

Поясним физический смысл выражения (9). Первые слагаемые в фигурных скобках описывают излучение из объема второй среды (земли), второе слагаемое относится к излучению из первой среды (атмосферы). Множитель  $\alpha^{\parallel\perp}(\varphi)$  учитывает угловую анизотропию приемной системы радиометра или радара.

Итак, радиояркостная температура и коэффициент обратного рассеяния линейно связаны между собой. Угловые зависимости данных параметров аналогичны.

© Ломухин Ю. Л., 2013

УДК 550.837

## СТРУКТУРА ВОДНОЙ ТОЛЩИ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА КОТОКЕЛЬ ПО ДАННЫМ ГЕОРАДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В. Б. Хаптанов, Ю. Б. Башкуев, М. Г. Дембелов

Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: valery433210@rambler.ru

*Представлены результаты георадарного исследования озера Котокель, на котором в 2008–2009 гг. наблюдалась вспышка «гафской» болезни. С помощью георадара «Око-2» получены убедительные данные о стратификации водной толщи и донных отложений озера. Сделан вывод о преимущественно тектоническом характере возникновения озерной котловины.*

*Ключевые слова: георадар, стратификация, донные отложения, озерная котловина, сейсмодислокация.*

\* Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №12-02-98007, №12-02-98002, №12-05-98051.

## STRUCTURE OF THE KOTOKEL LAKE WATER AND BOTTOM SEDIMENTS ACCORDING TO GPR SOUNDING

V. B. Khaptanov, Yu. B. Bashkuev, M. G. Dembelov

Institute of Physical Materials Science of the Siberian Branch Russian Academy of Sciences  
6 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: valery433210@rambler.ru

*The report presents the results of Kotokel lake GPR survey, where an outbreak of “gafskaya” disease occurred in 2008–2009. Convincing data on the stratification of the water column and sediments of the lake were received with the help of GPR “Eye-2”. Conclusion is made on essentially tectonic manner of occurrence of the lake basin.*

*Keywords: GPR, stratification, bottom sediments, lake basin, seismodislocation.*

Озеро Котокель привлекает внимание российских и иностранных ученых как опорный разрез позднеледниковья и голоцена юга Восточной Сибири. На основе детальной палиностратиграфии отложений котловины оз. Котокель и интерпретации этих изменений в терминах ответственных за них климатических факторов проведена реконструкция динамики растительности котловины [1]. С начала 2000-х гг. на акватории озера проводились исследования российско-японской группой [2]. Отбор проб из пробуренных скважин до глубины 16 м и радиоуглеродная датировка отложений позволили построить стратиграфические колонки и оценить скорость осадконакопления в период позднего плейстоцена-голоцена. Геоморфологические работы проводились Институтом земной коры СО РАН [3]. В связи с экологической катастрофой с 2008 г. по настоящее время действует запрет использования водоема в рекреационных, питьевых и хозяйственно-бытовых целях. Это было связано с ухудшением экологического состояния акватории и «цветением» воды в результате развития одноклеточных синезеленых водорослей (цианобактерий). Проблема обострилась вследствие водной связи озера с Байкалом. Имелась реальная угроза заражения вод оз. Байкал в районе устья р. Турка. Несмотря на проводимые исследования проблема «цветения» водоемов и происхождения «гафской болезни» остается нерешенной в глобальном масштабе. Остаются не исследованными физико-, термогидрологические, климатологические факторы создающие предпосылки возникновения опасной экологической ситуации.

**Геолокационное зондирование акватории.** Задача исследования озера и его донных отложений является классической со времен становления радиолока-

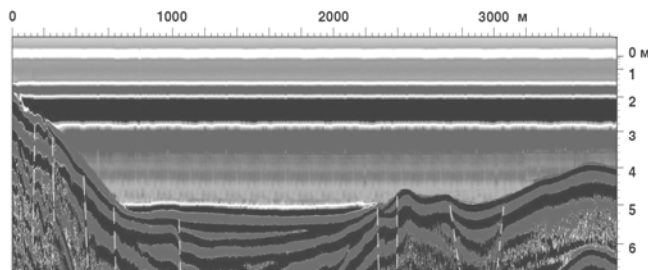
ции как метода подповерхностного зондирования подстилающей среды [4, 5]. Технология георадиолокации на воде предусматривает использование, как правило, низкочастотных антенн, которые располагаются на дне плавсредства или буксируются прямо по воде. Георадарные работы можно проводить с пластиковых или резиновых лодок и при глубинах от метров до десятков метров в зависимости от проводимости воды, определяющей ее поглощающую способность по излучению.

Георадиолокационные работы проводились с целью выявления профиля дна, толщины и строения донных отложений озера с помощью радиотехнического прибора подповерхностного зондирования (георадара) «Око-2» с антенным блоком АБДЛ «Тритон» производства ООО «Логис» (Москва) по заранее намеченным на карте профилям.

Профилирование выполнялось на 3 местной моторной лодке типа «Командор». Работа георадара осуществлялась в непрерывном режиме антенным блоком АБДЛ «Тритон» с центральной частотой 50 МГц в режиме буксировки на плаву. Координатная привязка профиля осуществлялась GPS-приемником Garmin GPSmap60CSx. Схемы расположения профилей на акватории озера и полученные радарограммы представлены на рис. 1, 2. Радарограмма поперечного профиля 1 северной части озера длиной 3,8 км, показывает сложный рельеф и слоистость дна озера (рис. 1, б). Максимальные глубины 5 м наблюдаются во впадине, заполненной осадками с выположенным верхним слоем. Смещения слоев в донных отложениях и их несогласное залегание свидетельствуют о наличии сейсмодислокаций, отмеченных на радарограмме пунктирными линиями.



а



б

Рис. 1. Профиль северной части оз. Котокель:  
а – схема расположения профиля на фрагменте спутникового изображения Google Earth;  
б – радарограмма профиля, полученная с помощью антенного блока «Тритон» с центральной частотой 50 МГц. Пунктирными линиями выделены сейсмодислокации

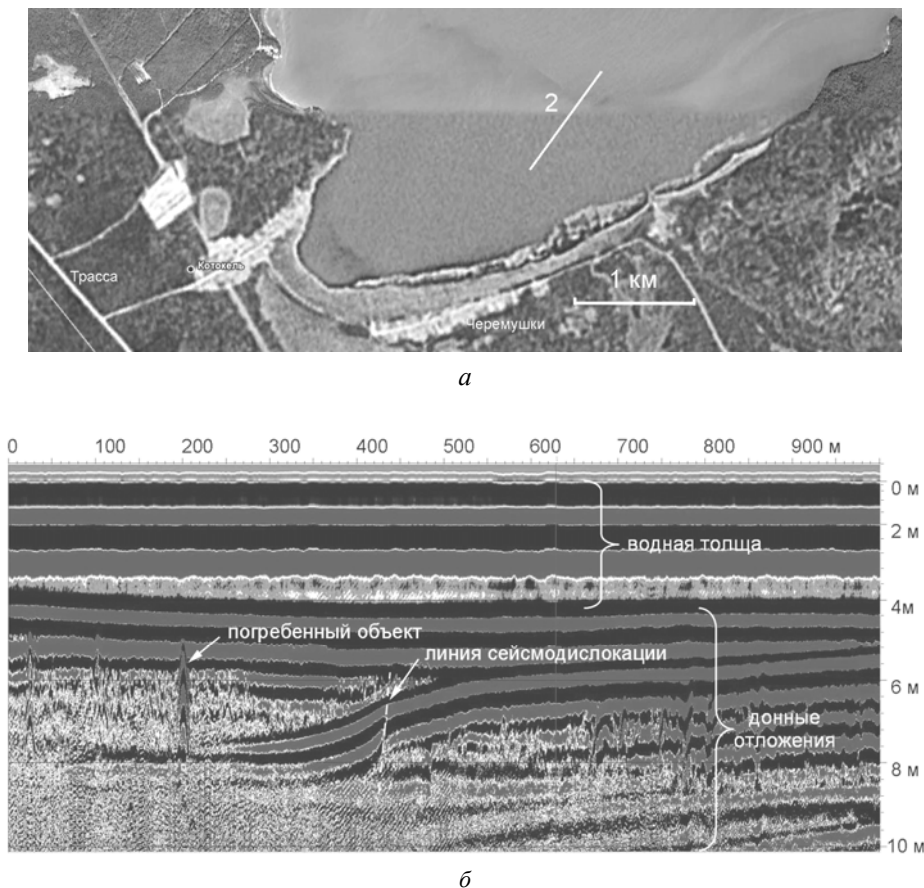


Рис. 2. Радарограмма южной части оз. Котокель.  
Георадар «Око-2», АБДЛ «Тритон»

На радарограмме профиля 2 протяженностью 1 км в южной части озера выделяются 3 слоя водной толщи и около десятка слоев донных отложений в ближней к берегу половине профиля (рис. 2). В центральной части профиля выявлена сейсмодислокация, по которой произошло опускание предыдущего участка профиля более чем на 2 м и заполнение образовавшейся ниши более проводящими осадками. О чем свидетельствует большее затухание сигнала, маскирующее слоистость разреза. В толще донных отложений имеются отдельные дифрагирующие объекты, один из которых отмечен как погребенный объект (рис. 2, б). Возможно это погребенный в осадках ствол дерева, произраставшего в данной местности в голоценовое время. По кратным гиперболам можно оценить диаметр ствола дерева около 0,5 м.

Георадарные исследования на акватории оз. Котокель выявили новые данные о строении водной толщи и донных отложений:

1. Установлено явление стратификации водной толщи озера. Выделяются 3 слоя воды с различными электрофизическими свойствами, приводящими к наличию отражения зондирующего сигнала от горизонтов 2 и 3,5 м. Стратификация водной толщи замедляет обменные процессы и может приводить к застойным явлениям и накоплению природных и антропогенных токсинов.

2. Высокое разрешение и проникающая способность сверхширокополосного георадара «Око-2» с центральной частотой 50 МГц позволили выявить около десятка слоев в донных осадочных отложениях с погребенными объектами и следами палеосейсмодислокаций. Погребенными объектами могут быть стволы древних деревьев, произраставших в данной местности в голоцене.

3. Выявлена палеосейсмодислокация в южной части озера Котокель свидетельствующая, возможно, о катастрофическом опускании части дна озера на более чем 2 м (подобном опусканию 200 км суши в результате Цаганского землетрясения 1862 г. в дельте р. Селенги и образовавшем мелководный залив Провал). Это дает инструментальное подтверждение преимущественно тектонического характера формирования озерных котловин Байкальского региона [6].

Полученные новые результаты о стратификации водной толщи и донных осадков озера, строения котловины озера находятся в русле интересов мирового сообщества, особенно в части безопасного использования водоемов.

#### Библиографические ссылки

1. Озеро Котокель – опорный разрез позднеледниковья и голоцена юга Восточной Сибири / Е. В. Безрукова и др. // Доклады Академии наук. 2008. Т. 420, № 2. С. 248–253.

2. Late Pleistocene and Holocene vegetation and climate records from Lake Kotokel, central Baikal region / K. Shichi, H. Takahara, S. K. Krivonogov et al. // Quaternary International. 2009. Vol. 205. P. 98–110.

3. Науки о Земле. URL: <http://www-sbras.nsc.ru/win/sbras/rep/rep2004/tom2/geo.pdf/>.

4. Зимин Ю. В. Радиолокационный метод исследований отложений торфа и сапропеля : дис. / МГУ им. Ломоносова. 1987.

5. Методические рекомендации по обследованию водоемов и болот с использованием георадара «Око-2» / ООО «Логические системы». 2007.

6. Тулохонов А. К. Колебания уровня озер как индикатор активности современных тектонических движений Забайкалья // Геоморфология. 1990. Вып. 1. С. 91–96.

### References

1. Bezrukova E. V. et al. Ozero Kotokel-oporniy razrez pozdnelednikovaya i golotsena yuga Vostochnoy Sibiri.

Doklady Akademii nauk (Proceedings of the Academy of Sciences). 2008. Vol. 420, no. 2, pp. 248–253.

2. Shichi K., Takahara H., Krivonogov S. K. et al. Late Pleistocene and Holocene vegetation and climate records from Lake Kotokel, central Baikal region. Quaternary International. 205. 2009. p. 98-110. Journal homepage: [www.elsevier.com/locate/quaint](http://www.elsevier.com/locate/quaint).

3. Available at: <http://www-sbras.nsc.ru/win/sbras/rep/rep2004/tom2/geo.pdf/>.

4. Zimin Yu.V. Radiolokatsionnyy metod isledovaniya otlojeniy torfa I sapropelya. Dissertation work. Moscow State University. 1987. 100 p.

5. Metodicheskie rekomendatsii po obsledovaniyu vodoemov I bolot s ispolzovaniem georadara Oко-2. (Handbook GPR survey of ponds and marshes). Ltd. “Logical Systems”. 2007.

6. Tulohonov A. K. Kolebaniya urovnya ozer kak indikator aktivnosti sovremeni tektonicheskikh dvizheniy Zabaykal'ya (Fluctuations of lakes' levels as an indicator of the recent tectonic movements).

© Хаптанов В. Б., Башкуев Ю. Б., Дембелов М. Г., 2013

УДК 621.371

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОДНОЙ СРЕДЫ РЕКИ СЕЛЕНГИ, ЕЕ ПРИТОКОВ И АКВАТОРИИ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Ю. Б. Башкуев, В. Б. Хаптанов, М. Г. Дембелов, Д. Г. Буянова, Л. Х. Ангархаева

Институт физического материаловедения СО РАН  
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: [buddich@mail.ru](mailto:buddich@mail.ru)

*Рассмотрены данные электрометрических исследований водной среды р. Селенга и акватории оз. Байкал. Установлена существенная изменчивость удельного электрического сопротивления (УЭС) в различных пунктах взятия проб воды из-за ее различной минерализации. Отмечено низкое УЭС грунтовых вод, взятых из колодцев, расположенных в районе дельты р. Селенга.*

*Ключевые слова: электрометрия, удельное электрическое сопротивление.*

## RESULTS OF ELECTROMETRIC ANALYSIS OF WATER SAMPLES OF THE RIVER SELENGA WITH ITS TRIBUTARIES AND THE LAKE BAIKAL WATER AREA

Yu. B. Bashkuev, V. B. Khaptanov, M. G. Dembelov, D. G. Buyanova, L. Kh. Angarkhaeva

Institute of Physical Materials Science of the Russian Academy of Sciences Siberian branch  
6 Sakhyanovoy st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: [buddich@mail.ru](mailto:buddich@mail.ru)

*The authors consider the data of electrometric analysis of water samples of the r. Selenga and Lake Baikal. Essential variability of specific electric resistance (SER) of different water sampling points due to its different mineralization was revealed, along with the observed low SER of ground waters from wells, located in the area of delta of the river Selenga.*

*Keywords: electrometric analysis, specific electric resistance.*

Данных об электропроводности воды реки Селенги и оз. Байкал в литературе немного [1–5]. Знание этих характеристик необходимо при решении ряда практических задач геофизической электродинамики и физической экологии. В работах [6–8] показана

целесообразность широкого использования удельного электрического сопротивления УЭС (УЭС – величина, обратная удельной электропроводности воды, измеряется в Ом · м.) природных вод  $\rho$  при геофизических, геологических и гидрологических исследованиях. Цель

\*Работа подготовлена при финансовой поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН №11 и грантов РФФИ № 12-02-98002, №12-02-98007, №12-05-98051, № 12-01-98010.