

УДК 504.064.36(282.256.341)

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ И ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОЗЕРА БАЙКАЛ

¹Макаров М.М., ¹Кучер К.М., ¹Асламов И.А., ²Петров И.А.

¹ФГБУН «Лимнологический институт» Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск;

²ФГБУН «Иркутский научный центр» Сибирского отделения Российской академии наук,
Иркутск, e-mail: mmmsoft@hlserver.lin.irk.ru

Представлен опыт создания системы экологического мониторинга, включающий в себя: подсистему сбора и обработки параметров водной среды озера Байкал и атмосферы; подсистему передачи данных в режиме реального времени по беспроводным каналам связи; подсистему хранения и визуализации с открытым доступом. В настоящее время в систему экологического мониторинга входит сеть автоматических гидрометеорологических станций, расположенных в Южной, Средней и начале Северной котловины озера Байкал. Все станции работают в автоматическом режиме, запитаны от солнечных батарей, собирают данные и передают их в центр сбора, хранения и визуализации данных через сотовую сеть по каналам GPRS. Любой пользователь сети Интернет может зайти на веб-страницу системы экологического мониторинга и просмотреть доступные данные за выбранный интервал времени. Интеграция в существующую систему зонда качества воды позволила значительно расширить список измеряемых параметров гидрохимическими показателями и может со временем дать новую информацию для понимания причин развивающегося экологического кризиса на озере Байкал. Разработанная система актуальна для ведомственных служб, таких как: МЧС, ГидроМет, РусГидро, и может быть источником дополнительной информации для принятия оперативных решений.

Ключевые слова: экологический мониторинг, гидрофизические процессы, сейшевые колебания, оз. Байкал

THE MONITORING SYSTEM OF HYDROPHYSICAL AND HYDROCHEMICAL PARAMETERS OF LAKE BAIKAL

¹Makarov M.M., ¹Kucher K.M., ¹Aslamov I.A., ²Petrov I.A.

¹Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk;

²Irkutsk Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Science,
Irkutsk, e-mail: mmmsoft@hlserver.lin.irk.ru

The article presents the experience of creating an environmental monitoring system, which includes: a subsystem for collecting and processing parameters of the water environment of lake Baikal and the atmosphere; a subsystem for real-time data transmission via wireless communication channels; a subsystem for storage and visualization with open access. Currently, the environmental monitoring system includes a network of automatic hydrometeorological stations located in the southern, Middle and Northern basin of Lake Baikal. All stations operate in automatic mode, powered by solar panels, collect data and transmit them to the data collection, storage and visualization center through the cellular network via GPRS channels. Any Internet user can visit the web page of the environmental monitoring system and view the available data for the selected time interval. Integration of the water quality probe into the existing system has significantly expanded the list of measured parameters with hydrochemical indicators and may, over time, provide new information for understanding the causes of the developing environmental crisis at Lake Baikal. The developed system is relevant for the departmental services, such as EMERCOM, Hydromet, RusHydro, and can be a source of additional information for operational decision-making.

Keywords: ecological monitoring, hydrophysical processes, seiche oscillations, Lake Baikal

Охрана окружающей среды и рациональное природопользование являются одной из приоритетных фундаментальных научных проблем. Экологическая доктрина Российской Федерации одобрена распоряжением Правительства РФ от 31 августа 2002 г. № 1225-р. Современный экологический кризис ставит под угрозу возможность устойчивого развития человеческой цивилизации, поскольку дальнейшая деградация природных систем ведет к дестабилизации биосферы, утрате ее целостности и способности поддерживать качества окружающей среды, необходимые для жизни человека. Биоразнообразие является важнейшим фактором функционирования экосистем и мно-

гочисленные исследования показали, что снижение видового разнообразия в сообществах ведет к деградации их экосистемных функций [1–3]. Согласно текущему законодательству, экологический мониторинг должен поддерживаться научными исследованиями и служить навигатором объектов экологического контроля [4].

В последние годы рядом исследователей отмечаются характерные признаки экологического кризиса в прибрежной зоне озера Байкал [5]. Кризис характеризуется массовым развитием зеленых нитчатых водорослей (*Spirogira Link*) и массовым заболеванием и гибелью эндемичных губок (*Lubomirskia baikalensis*) [6]. Губки явля-

ются превалирующими видами макрозообентоса литорали и играют огромную роль в поддержании чистоты вод прибрежной зоны. Гибель этого вида может иметь катастрофические последствия для экологии уникального озера и биоразнообразия озерной экосистемы.

Развитие систем онлайн-мониторинга различных параметров водного экологического баланса, таких как температура воды, солнечная радиация, ветровой режим, химические и биогенные компоненты и т.д., может дать дополнительную информацию для понимания причин развивающегося экологического кризиса на озере Байкал. Особенно, если такие системы будут работать автономно, в круглосуточном режиме, и передавать данные в ситуационный центр, для принятия оперативных решений. Таким образом, целью работы являлась разработка и реализация системы онлайн-мониторинга гидрофизических, гидрологических и метеорологических параметров Байкальской экологической зоны.

Материалы и методы исследования

Автономный онлайн-комплекс разработан сотрудниками лаборатории гидрологии и гидрофизики Лимнологического института СО РАН. Комплекс предназначен для сбора и передачи в режиме реального времени гидрологической, гидрохимической и метеорологической информации по беспроводным каналам связи на удаленный интернет-сервер.

Комплекс состоит из подводного кластера (гидрофизические и гидрохимические датчики, датчик

уровня воды), берегового кластера (метеорологические датчики, система сбора, хранения и передачи данных) и серверного кластера (база данных и WEB интерфейс доступа к данным) (рис. 1). Подводный гидрофизический кластер выполнен на базе мониторингового зонда качества воды AAQ177 Rinko (JFE Advantech, Япония) [7], а также датчика уровня воды (разработки лаборатории гидрологии и гидрофизики ЛИН СО РАН).

Береговой кластер разработан в ЛИН СО РАН и обеспечивает опрос метеорологических датчиков Vantage Pro 2 (Davis Instruments, США) [8] и подводного кластера, с дальнейшей передачей измеренных параметров в центр обработки данных через сотовую сеть по каналам GPRS. Серверный кластер обеспечивает получение, систематизацию, хранение и удаленный доступ к накопленным данным с сети мониторинговых станций. WEB-интерфейс, реализованный на сервере, позволяет просматривать и сравнивать любые доступные параметры за выбранный период времени. Реализована возможность работы с данными в отложенном режиме, для этого необходимо выбрать набор интересующих данных и интервал времени, после чего система позволит загрузить их на компьютер в виде упакованного архива. Все полученные данные находятся в свободном доступе по адресу www.hydro.lin.irk.ru.

Список гидрофизических, гидрохимических и метеорологических параметров, измеряемых онлайн-мониторинговым комплексом, представлен в таблице. Они могут быть изменены путем добавления в состав комплекса дополнительных датчиков.

Нужно отметить несколько особенностей данного комплекса:

1. Сетевая архитектура. Серверный кластер может получать и обрабатывать данные одновременно от большого количества береговых станций.

Мониторинговый комплекс

<div style="background-color: #d9ead3; padding: 5px; border: 1px solid #ccc;"> <p style="text-align: center; margin: 0;">Серверный кластер</p>  <p style="margin: 5px 0;">Центр обработки данных и WEB интерфейс выполняет:</p> <ul style="list-style-type: none"> Получение и первичную обработку данных Хранение и выгрузку данных по запросу SQL Отображение данных в виде графиков за выбранный интервал времени Сравнение различных параметров в единой временной шкале </div>	<div style="background-color: #d9ead3; padding: 5px; border: 1px solid #ccc;"> <p style="text-align: center; margin: 0;">Береговой кластер АГМС-3 (ЛИН СО РАН)</p> <p>Параметры:</p> <ul style="list-style-type: none"> УФ, солнечная радиация Скорость и направление ветра Температура и влажность воздуха Атмосферное давление Температура воды Уровень воды  </div>
<div style="background-color: #d9ead3; padding: 5px; border: 1px solid #ccc;"> <p style="text-align: center; margin: 0;">Подводный кластер</p> <p>JFE AAQ177 RINKO</p> <p>Параметры:</p> <ul style="list-style-type: none"> Электропроводность Взвешенные частицы Хлорофилл Растворенный кислород Освещенность pH, оки-но вост-ный потенциал  </div>	

Рис. 1. Структура мониторингового комплекса

Измеряемые параметры, точность и их разрешающая способность
(параметры помечены индексом: 1 – JFE Advantech, 2 – Davis Instruments, 3 – ЛИН СО РАН)

Измеряемый параметр	Диапазон измерения	Разрешение	Точность	Время отклика
Глубина ¹	0–100 м	0,002 м	±0,3% Полной шкалы	0,2 с
Температура воды ¹	–3–45 °C	0,001 °C	±0,01 °C (0–35 °C)	0,2 с
Электропроводность ¹	0–2000 $\mu\text{S cm}^{-1}$	0,1 $\mu\text{S cm}^{-1}$	±2 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (0 to 200 $\mu\text{S cm}^{-1}$)	0,2 с
Взвешенное вещество ¹	0–1,000 FTU	0,03 FTU	±0,3 FTU или ±2%	0,2 с
Хлорофилл ¹	0–400 ppb	0,01 ppb	±1% Полной шкалы	0,2 с
Растворенный кислород ¹	0–20 mg L ⁻¹ (0–200%)	0,001–0,004 mg L ⁻¹	±0,4mg L ⁻¹ (±2% Полной шкалы)	0,4 с
Фотосинтетически активная радиация в воде ¹	0–5,000 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	0,1 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	±4%	0,2 с
Водородный показатель ¹	2–14 pH	0,01 pH	±0,2 pH	10 с
Окислительно-восстановительный потенциал ¹	0 – ±1,000 мВ	0,1 мВ	–	10 с
Атмосферное давление ²	420–820 мм рт. ст.	0,1 мм рт. ст.	1,3 мм рт. ст.	1 с
Влажность воздуха ²	0–100%	1%	0–100%	1 с
Количество осадков ²	0–999,9 мм	0,25 мм	4%	1 с
Температура воздуха ²	–40 – +65 °C	0,1 °C	0,5 °C	1 с
Направление ветра ²	0–360°	1°	0,3%	1 с
Скорость ветра ²	0,5–89 м/с	0,4 м/с	5%	1 с
Приходящая солнечная радиация ²	0–1800 Вт/м ²	1 Вт/м ²	5%	1 с
Индекс UV ²	0–16	0,1	8%	1 с
Уровень воды ³	0–6 м	0,5 мм	1%	1 с

2. Наличие встроенного GSM терминала позволяет в режиме реального времени передавать данные на сервер. При отсутствии в районе установки станции сетей сотовой связи предусмотрена возможность подключения спутникового терминала или работы в полностью автономном режиме, с сохранением собранных данных на сменной энергонезависимой карте памяти типа SD.

3. Встроенная карта памяти отформатирована в FAT32, поэтому записанные данные могут быть считаны из любой операционной системы без использования специализированных программ.

4. Для синхронизации времени в устройстве интегрирован приемник географических координат (ML8088s производства ООО «НАВИА» Россия), обеспечивающий привязку к атомным часам спутников ГЛОНАСС и GPS. Интегрированный приемник сигналов ГЛОНАСС сопровождает измеряемые параметры метками точного времени, что позволяет анализировать изменения пространственно разнесенных параметров в единой временной шкале.

5. Автономность. Береговой и подводный кластер питаются от свинцового аккумулятора напряжением 12В. Заряд производится от солнечной панели мощностью 30 и более Вт. В схему питания интегрирован контроллер заряда, поддерживающий оптимальное зарядное напряжение в зависимости от температуры аккумуляторов, и обеспечивающий их защиту от перезаряда и глубокого разряда, что существенно продлевает срок службы аккумуляторов.

Вышеперечисленные особенности позволяют полностью отказаться от береговой инфраструктуры, и позиционируют комплекс как полностью автономный. Малые габариты, антивандальный утепленный корпус позволяет размещать бокс с оборудованием на метеомачте. Наличие в устройстве внешних I²C и COM портов, а также резервных аналоговых каналов, открывает возможности ее гибкого расширения: оснащения дополнительными датчиками, подключения внешнего оборудования.

Результаты исследования и их обсуждение

В настоящее время гидрохимические наблюдения за акваторией озера Байкал осуществляет подразделение Министерства природных ресурсов РФ – ФГУ «Востсибрегионводхоз». Главным инструментом этой организации является судно «Исток», несущее на себе программно-аппаратный комплекс «Акватория Байкал – 2», позволяющий осуществлять непрерывные измерения гидрохимических и гидрофизико-химических параметров водной среды по четырнадцати показателям в процессе движения судна [9]. Однако такие измерения проводятся эпизодично в нескольких экспедициях за один навигационный период.

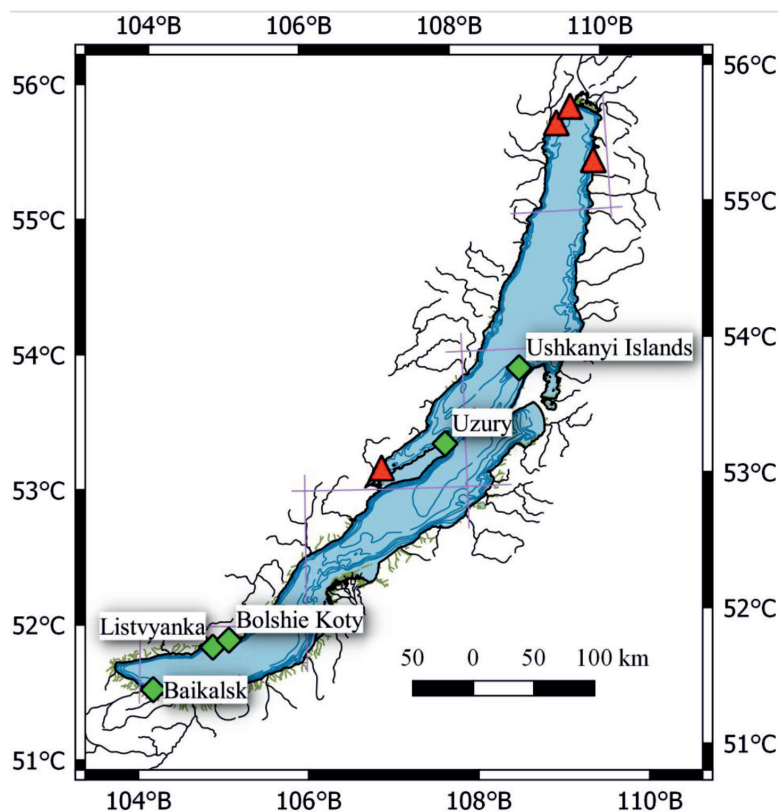


Рис. 2. Расположение установленных (зеленые ромбы), и планируемых к установке (красные треугольники) станций экологического мониторинга на оз. Байкал

Использование онлайн-мониторингового комплекса позволит получать непрерывные ряды данных основных параметров воды литоральной зоны в течение всего года. На данный момент в разработанную систему экологического мониторинга входит сеть станций, состоящая из пяти пунктов, расположенных в Южном, Среднем и Северном Байкале (рис. 2), зеленые ромбы. Станции, оснащенные метеорологическими датчиками и измерителями уровня озера. Благодаря разработанному датчику уровня озера, входящему в состав комплекса, измерение колебаний уровня производится с высоким разрешением по амплитуде (0,5 мм) и частоте (1 Гц), что на порядок превышает точность измерения уровня на постах Росгидромета, где измерения проводятся по стандартной схеме, дважды в сутки, с точностью по амплитуде не более 1–2 см.

Результаты измерений с развернутой сети онлайн-мониторинговых станций и их интеграция в одну систему, охватывающую весь Байкал, позволили изучать пространственную изменчивость колебаний уровня, выполнять как более качественное

и надежное разделение разночастотных колебаний уровня, так и более достоверную интерпретацию полученных результатов. В частности, был проведен детальный анализ амплитуд сейшевых колебаний Байкала и их сезонной изменчивости [10]. Благодаря высокой частоте и точности измерений уровня впервые были выявлены отклики уровня Байкал на сильные удаленные землетрясения, выражающиеся в генерации квазипериодических колебаниях уровня с периодами от 1 до 2 мин, что значительно меньше периодов поперечных и тем более продольных сейш [11].

В 2018 г. станция, установленная на пирсе ЛИН СО РАН в п. Листвянка, была оснащена подводным зондом AAQ177 Rinko с гидрохимическими и гидрофизическими датчиками, которые позволяют выявить сезонные изменения растворенного кислорода, водородного показателя, окислительно-восстановительного потенциала, фотосинтезирующей радиации и других показателей в литоральной части озера. Такого набора параметров достаточно, чтобы судить о качестве воды и отслеживать ее изменения в течение года.

Заключение

Разработана система мониторинга гидрофизических и гидрохимических параметров озера Байкал. Изготовлено и установлено пять станций онлайн-мониторинга, позволяющих получать непрерывные ряды данных основных параметров воды литоральной зоны. Получаемые данные находятся в открытом доступе, интерфейс сервера позволяет как оперативно визуализировать полученные данные, так и выгружать данные для последующего анализа в табличном формате. В дальнейшем планируется расширение сети мониторинговых станций, планируемые места их установки обозначены на рис. 2 красными треугольниками. Также планируется их дооснащение зондами качества воды.

Экономическое преимущество разработанных мониторинговых станций заключается в их неприхотливости, не требующей дополнительного обслуживания со стороны человека. Питание от солнечных батарей позволяет полностью исключить затраты на их энергообеспечение, а расходы на передачу данных через сотовые каналы связи не превышают 1000 рублей в год на одну станцию.

Работа выполнена при поддержке Интеграционной программы ИИЦ СО РАН «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей» (2018–2021 гг.).

Список литературы

1. Павлов Д.С., Стриганова Б.Р., Букварева Е.Н. Экологическая концепция природопользования // Вестник РАН. 2010. № 80 (2). С. 131–140.
2. Soliveres S., Smit C., Maestre F.T. Moving forward on facilitation research: response to changing environments and effects on the diversity, functioning and evolution of plant communities. *Biol Rev Camb Philos Soc.* 2015. № 90 (1). P. 297–313. DOI: 10.1111/brv.12110.
3. Chan K.M., Balvanera P., Benessaiah K., Chapman M., Díaz S., Gómez-Baggethun E., Gould R., Hannahs N., Jax K., Klain S., Luck G.W., Martín-López B., Muraca B., Norton B., Ott K., Pascual U., Satterfield T., Tadaki M., Taggart J., Turner N. Opinion: Why protect nature? Rethinking values and the environment. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2016. № 113 (6). P. 146–125.
4. Федеральный закон «Об охране озера Байкал» (№ 94-ФЗ от 01.05.1999).
5. Тимошкин О.А., Бондаренко Н.А., Волкова Е.А., Томберг И.В., Вишняков В.С., Мальник В.В. Массовое развитие зелёных нитчатых водорослей родов *Spirogyra* Link и *Stigeoclonium* Kutz. (CHLOROPHYTA) в прибрежной зоне Южного Байкала // *Гидробиологический журнал.* 2014. № 5. С. 15–26.
6. Деникина Н.Н., Дзюба Е.В., Белькова Н.Л., Хананев И.В., Феранчук С.И., Макаров М.М., Гранин Н.Г., Беликов С.И. Первый случай заболевания губки *Lubomirskia baicalensis*: исследование микробиома // *Известия РАН. Серия биологическая.* 2016. № 3. С. 315–322. DOI: 10.7868/S0002332916030024.
7. Water quality profiler with fast optical DO sensor. JFE Advantech [Электронный ресурс]. URL: [http://www.jfe-advantech.co.jp/eng/ocean/pdf/AAQ-RINKO\(E\)_201607.pdf](http://www.jfe-advantech.co.jp/eng/ocean/pdf/AAQ-RINKO(E)_201607.pdf) (дата обращения: 01.09.2018).
8. Vantage Pro2 Specification Sheets // Davis Instruments [Электронный ресурс]. URL: https://www.davisinstruments.com/product_documents/weather/spec_sheets/6152_62_53_63_SS.pdf (дата обращения: 12.10.2018).
9. Паршин А.В., Руш Е.А., Спиридонов А.М. Автоматизация процесса обеспечения экологического мониторинга озера Байкал с применением современных ГИС и WEB технологий // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* 2011. № 1. С. 82–87.
10. Смирнов С.В., Кучер К.М., Гранин Н.Г., Стурова И.В. Сейшевые колебания Байкала // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* 2014. Т. 50. № 1. С. 105–116. DOI: 10.7868/S000235151305012X.
11. Гранин Н.Г., Радзиминович Н.А., Кучер К.М., Чельницкий В.В. Генерация колебаний уровня озера Байкал удаленными сильными землетрясениями // *Доклады Академии наук (Науки о земле).* 2014. Т. 455. № 2. С. 224–228.