

УДК 551.46

А.И. Зайцев^{1,3}, С.В. Сёмин^{2,4}, И.С. Костенко^{1,2}

НАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ОЗЕРЕ ТУНАЙЧА

Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН¹,
г. Южно-Сахалинск

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²,
Институт прикладной физики Российской академии наук³,
Университет Южного Квинсленда⁴, г. Тувумба, Австралия

Цель: изучение существующего в настоящее время водообмена озера Тунайча с Охотским морем. Поиск путей улучшения водообмена в озере.

Научный подход: разработка автономной зондирующей измерительной системы с использованием датчиков AANDERAA. Измерение ряда параметров толщи воды в заданных горизонтах в северной части озера Тунайча. Используя данные измерений выполнено численное моделирование распространения морской воды в озере с помощью программного комплекса MITgcm. Проведен анализ результатов наблюдения и моделирования.

Результат: используя данные моделирования, построено распределение гидрологических параметров на протяжении четырёх приливных циклов. Анализ показал, что максимальные скорости течения наблюдаются в узком месте озера (наименьшее расстояние между берегами и меньшие глубины по сравнению с остальной частью озера); температура на поверхности в районе узкого места озера на 2-3 градуса ниже, чем на соседних участках; наблюдается увеличение солёности в этом месте. Это может свидетельствовать о подъеме глубинных слоев воды в данном районе.

Новизна: в результате проведения измерений гидрологических параметров в толще жидкости от поверхности до дна в заданных горизонтах получены уникальные для этого района данные, многие из которых впервые. С помощью численного моделирования получено распределение солёности, температуры и скоростей течений, что будет использовано для понимания особенностей циркуляции вод в озере и его водообмена с морем.

Ключевые слова: автономная зондирующая измерительная система, водообмен озера Тунайча, центр сбора и обработки данных, численное моделирование.

Введение

Озеро Тунайча расположено в юго-восточной части о. Сахалин. Его площадь составляет 174 км², длина 29 км, ширина 6 км. Озеро лагунного типа, соленое.

Экологические проблемы озера Тунайча обусловлены отсутствием вентиляции его придонных водных слоёв холодными водами Охотского моря, присутствие которых обязательно для сохранения биообразования и экологического равновесия в водах озера. Основной причиной сложившейся ситуации является обмеление пролива Красноармейский, который соединяет озеро с заливом Мордвинова (Охотское море). Проведена серия измерений ряда параметров толщи воды в северной части озера Тунайча к югу от пролива Красноармейский (рис. 1).

В результате реализации данной работы будут получены оптимальные размеры протоки Красноармейская, необходимые для сохранения биообразования и экологического равновесия в водах озера. Значимость результатов научно-исследовательского проекта для развития социально-экономического потенциала Сахалинской области очевидна.

Озеро Тунайча называют жемчужиной Сахалина, потому что оно - одно из самых крупнейших и, пожалуй, самых глубоких и богатых водоемов острова. В озеро в период нереста заходят лососёвые, всего в его водах обитает 29 видов рыб, в том числе редчайший сахалинский таймень, карповые и корюшковые. В реках, сообщающихся с озером, водится форель. На берегах озера можно увидеть целые колонии птиц. Здесь встречаются орлан-

белохвост, утка мандаринка, хищная птица скопа, лебеди и цапли, которые прилетают сюда для прокорма.



Рис. 1. Проведение измерений в районе пролива Красноармейский (северная часть озера Тунайча)

Средства измерения

В данной работе представлены результаты измерений автономной зондирующей измерительной системой (автономная позиционная станция (АПС) «ЭКОЗОНД»), разработанной СКБ САМИ ДВО РАН с использованием датчиков AANDERAA. Система оснащена датчиками волнения, скорости течения, солёности, температуры, радиометрического анализа (гамаспектрометр), содержания нефтепродуктов, кислорода.

Данный прибор предназначен для мониторинга водной среды. Он производит зондирующие измерения в толще жидкости от поверхности до дна в заданных горизонтах, передавая результаты измерений по радио или спутниковому каналу в центр сбора и обработки информации в автоматическом режиме. Центр сбора и обработки данных может размещаться на берегу или на судне, принимать и обрабатывать данные от нескольких десятков станций по радио или спутниковому каналу связи.

Эта разработка является уникальной. В данных гидрологических условиях нет возможности проводить измерения приборами, типа AANDERAA RDCP 600 (из-за высокой стратификации по температуре и солёности измерения акустического прибора данного типа будут неверные).

Данные измерения будут использованы для численного моделирования распространения морской воды в озере Тунайча. Моделирование будет проведено с помощью программного комплекса MITgcm, который предназначен для изучения геогидродинамических процессов широкого спектра масштабов: от конвекции в небольших водоёмах (в том числе и в опытовых лотках) до глобальных циркуляционных структур и термохалинных течений. В результате проведения серии расчетов будет изучен существующий водообмен, а также найден оптимальный для улучшения водообмена в озере. Мировой опыт показывает необходимость применения численного моделирования для решения подобных задач.

Для обеспечения свободного всплытия станция имеет расчетную положительную плавучесть 5 кг. Пост (береговой, судовой) приема информации (рис. 2) состоит из антенны УКВ, размещенной на мачте, модема УКВ, управляющего компьютера и источника питания.

Измерительная система состоит из герметичных цилиндрических модулей (рис. 3): аппаратного 1, и питания 2, лебедки с тросом 3, прикрепленной к нижней крышке модуля питания, измерительных датчиков 4, и антенны связи 5 на верхней крышке аппаратного

модуля. Верхний конец троса намотан на барабан лебедки, а нижний конец крепится к якорю-балласту, расположенному на дне.

АПС «ЭКОЗОНД» имеет следующие характеристики:

- максимальная глубина погружения - 200 м (в текущей конфигурации);
- точность выхода на горизонт измерений 0,1% от максимального значения рабочей глубины станции (для 200 м составляет 20 см);
- общее количество датчиков: с цифровым входом RS-232 шесть, а также есть возможность подключить шесть аналоговых датчиков;
- связь со станцией: радиоканал (может оснащаться дополнительно спутниковым модемом Globalstar, «Гонец» или гидроакустическим каналом связи). Проверка дальности передачи информации по радиоканалу до 40 км в условиях прямой радиовидимости;
- допустимое количество АПС на один центр сбора информации по УКВ каналу до 100, по спутниковому каналу зависит от выделенного ресурса;
- максимальное количество циклов измерений при энергии источника питания 3800 Вт*часов составит 200 циклов на 200 м; общее время нахождения в режиме ожидания 240 сут.;
- вес на воздухе с базовым комплектом датчиков 45 кг;
- допустимая скорость течения в районе установки 0,6 – 1,0 узел.



Рис. 2. Пост (береговой, судовой) приема информации

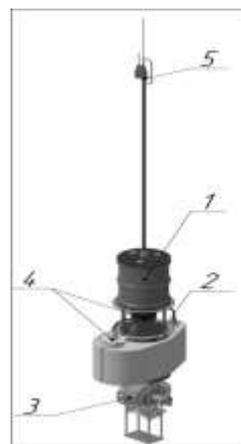


Рис. 3. АПС «ЭКОЗОНД»

Полученные измерительные данные

На рис. 4 – рис. 6 представлены данные одного прохода станции от поверхности до глубины в северной части озера Тунайча к югу от пролива Красноармейский.

До глубины 12 м изменения скорости незначительны (1,6-8,5 см/с) (рис. 4). На глубинах более 12 м наблюдается резкое увеличение скорости течения до 35 см/с. Это может быть обусловлено поступлением в придонные слои морских вод из залива Мордвинова, так как на протяжении всего периода наблюдений был прилив в море.

Температура воды на глубинах от 2 до 7 м практически не изменяется и находится на уровне 11,8 °С (рис. 5). Однако на глубинах от 7 до 10 м наблюдается резкий температурный скачок до 10,6 °С. Это связано с тем, что в начале июня верхние слои озера более прогреты, а при приливно-отливном режиме перемешиваются только нижние слои. Далее температура воды уменьшается незначительно.

На рис. 6 представлен график изменения электропроводности, которая зависит от солёности воды. На данном графике стоит выделить резкое ее понижение на глубине 8 м, что может быть объяснено наблюдавшимся в то время приливом и размером протоки соединяющей озеро с Охотским морем.

Похожая ситуация изменения электропроводности наблюдается и при других измерениях этого же профиля, но в разное время (рис. 7).

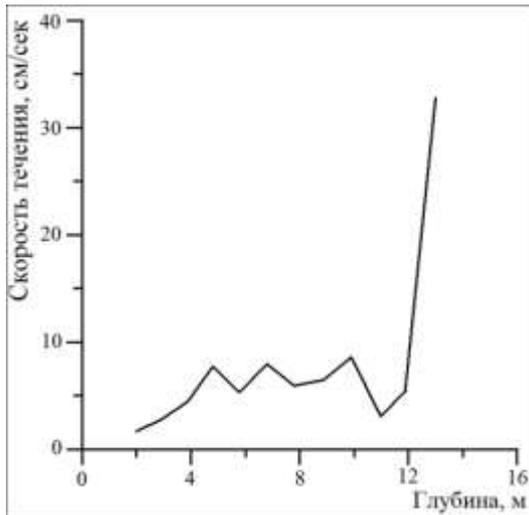


Рис. 4. Изменение скорости течения по профилю измерения в 15 ч 21 мин

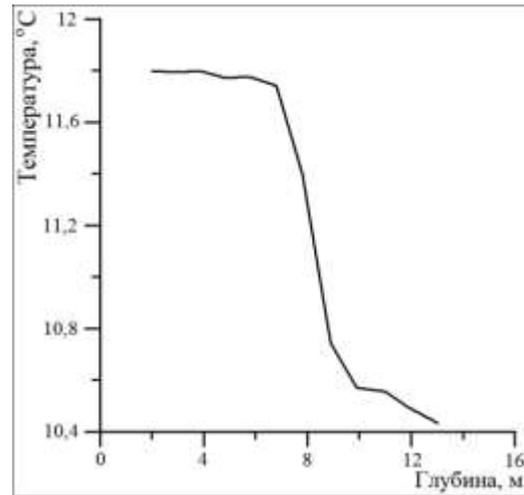


Рис. 5. Изменение температуры по профилю измерения в 15 ч 21 мин

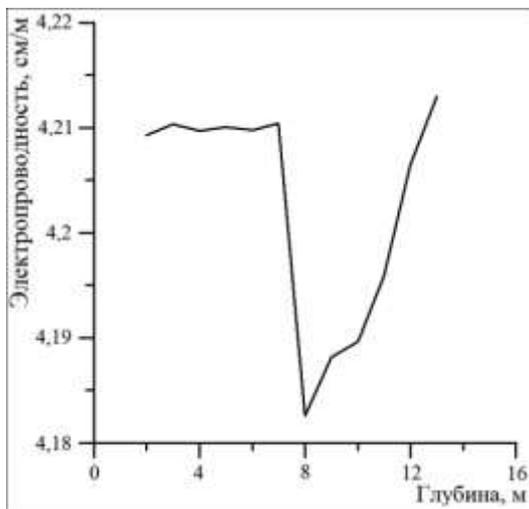


Рис. 6. Изменение электропроводности по профилю измерения в 15 ч 21 мин

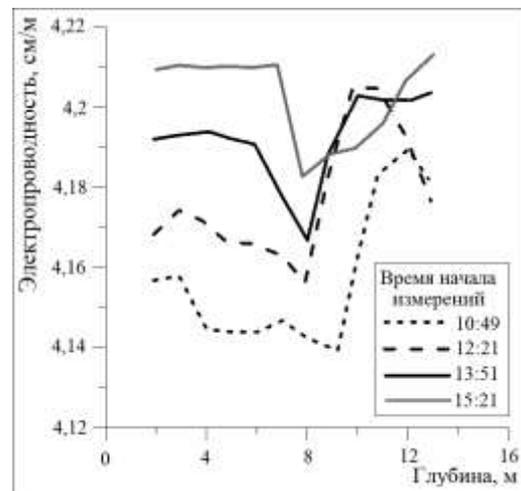


Рис. 7. Изменение электропроводности по одному профилю измерения в разное время

Численное моделирование

Для численного моделирования был использован программный комплекс MITgcm (<http://mitgcm.org/>). Стоит отметить, что авторы неоднократно использовали результаты натурных экспериментов и численного моделирования для исследования прибрежной зоны о. Сахалин [1, 2]. Он предназначен для изучения геогидродинамических процессов широкого спектра масштабов: от конвекции в небольших водоёмах (в том числе и в опытных лотках) и до глобальных циркуляционных структур и термохалинных течений.

Благодаря двухуровневой архитектуре, разделяющей реализацию численной схемы и уникальный программный интерфейс для организации распределенных вычислений, комплекс MITgcm обладает уникальной гибкостью и переносимостью на различные вычислительные платформы. Используемая система позволяет описывать динамику несжимаемой жидкости в уравнениях Навье-Стокса с учетом приближения Буссинеска в пространстве размерности 3+1 [3–5]. Используемый комплекс позволяет учитывать негидростатическое давление, что значительно увеличивает точность расчетов эволюции нелинейных волновых процессов.

Рассматриваемый программный продукт является общепризнанным среди научного

сообщества и уже не раз использовался для моделирования динамики закрытых, полузакрытых водоемов и заливов, например, в Бискайском заливе [6] или в озере Каюга [7].

Используя имеющиеся данные, а также информацию о сезонных колебаниях параметров водной среды из [8, 9], было проведено моделирование эволюции внутренней среды озера на протяжении четырёх приливных циклов.

Относительное распределение скоростей показано на рис. 8. Видно, что максимальные придонные скорости наблюдаются в узком месте озера, что также объясняется особенностью батиметрии. В данном месте наименьшее расстояние между берегами и меньшие глубины, южнее и севернее расположены впадины, что объясняет характер распределения солёности (рис. 9). Стоит отметить, что эти скорости с вероятностью 0.5 превышают скорость приливного потока.

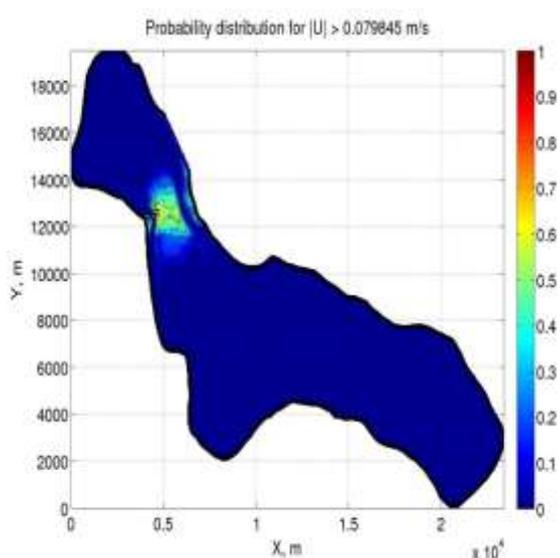


Рис. 8. Вероятность превышения придонной скорости порогового значения приливного потока ($U > 0.079$ м/с)

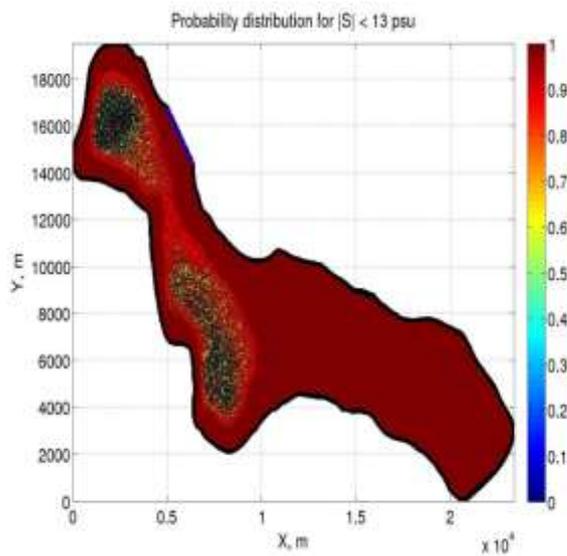


Рис. 9. Вероятность падения средней солёности в столбе жидкости ниже 13 ‰ за время расчетов

На рис. 10 изображено распределение профиля температуры по центру озера, обозначенного линией на рис. 11. Данное распределение показывает, что температура на поверхности в районе узкого места озера на 2-3 градуса ниже, чем на соседних участках. Причиной этого является перемешивающий эффект приливного потока.

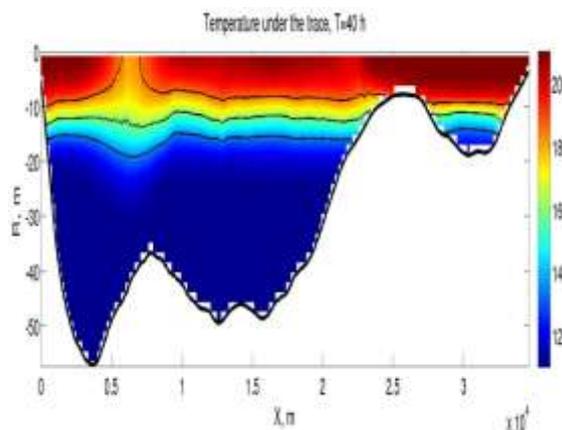


Рис. 10. Распределение профиля температуры

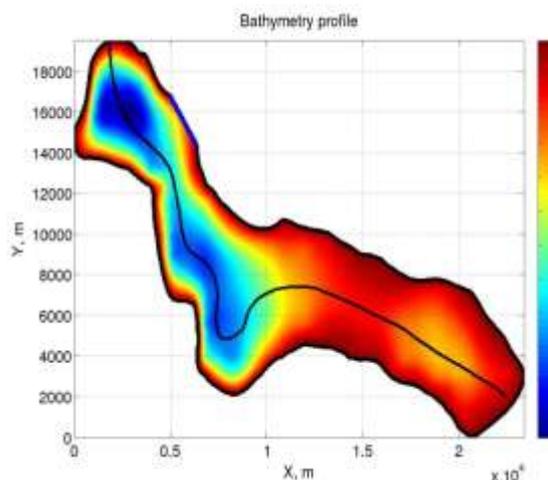


Рис. 11. Батиметрия озера Тунайча: черной кривой обозначен профиль, под которым проводился замер гидрологических параметров в численной модели

На рис. 12 показано распределение солёности под тем же профилем рис. 11. Как и для температуры, здесь наблюдается расплывание халоклина под действием поля приливного течения, что вызывает поднятие солёной жидкости ближе к поверхности озера.

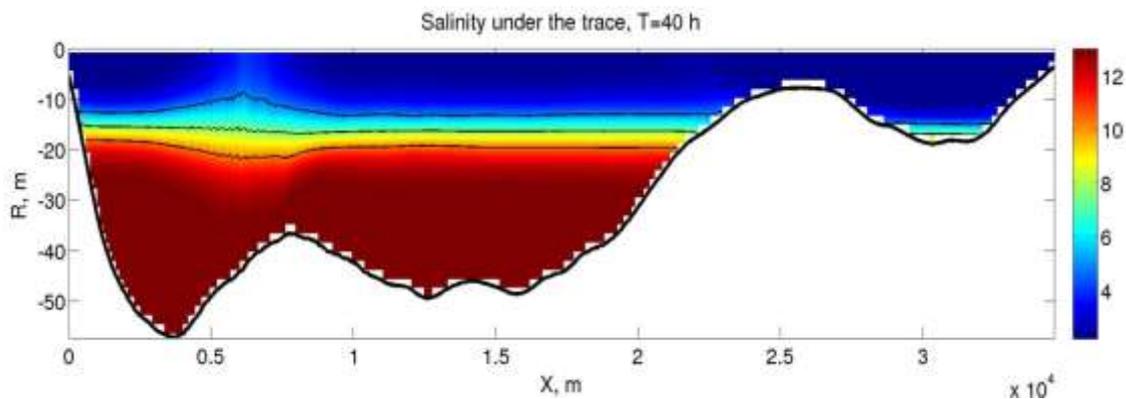


Рис. 12. Распределение профиля солёности

Выводы

В данной работе представлена отработанная методика измерений гидрологических параметров в толще жидкости (от поверхности до дна) в заданных горизонтах в сложных гидрологических условиях. В результате проведённых измерений получены уникальные данные для этого района, многие впервые. Используя эти данные, с помощью программного комплекса MITgcm было проведено численное моделирование распределения гидрологических параметров в озере Тунайча. Получено распределение солёности, температуры и скоростей течений в озере. Анализ показал увеличение температуры, солёности и скорости течений в узком месте озера, к северу и югу от которого расположены впадины. Полученные результаты будут использованы для понимания особенностей циркуляции вод в озере и его водообмена озера с морем.

Представленные результаты поисковой научно-исследовательской работы получены в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 годы» (соглашение № 14.В37.21.0642), при поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым СП-1935.2012.5, стипендии Президента Российской Федерации для обучения за рубежом студентов и аспирантов российских вузов в 2013/2014 учебном году, грантов РФФИ 11-05-00216-а, 11-05-92002, 13-05-97037 и МК-5222.2013.5, гранта Правительства Сахалинской области для молодых учёных.

Библиографический список

1. **Зайцев, А.И.** Невельское цунами 2 августа 2007 года: инструментальные данные и численное моделирование / А.И. Зайцев [и др.] // Доклады Академии наук. 2008. Т. 421. № 2. С. 249 – 252.
2. **Зайцев, А.И.** Моделирование распространения катастрофического цунами (26 декабря 2004 г.) в Индийском океане / А.И. Зайцев [и др.] // Доклады Академии наук. 2005. Т. 402. № 3. С. 388-392.
3. **Adcroft, A.** The MITgcm User Manual. MIT Department of EAPS / A. Adcroft [et al.] / – Cambridge, MA, 2008. – 464 p.
4. **Marshall, J.** A finite-volume, incompressible navier stokes model for studies of the ocean on parallel computers / J. Marshall [et al.] // J. Geophysical Res. 1997. V. 102(C3). P.5753–5766.
5. **Marshall, J.** Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling / J. Marshall, C. Hill, L. Perelman, A. Adcroft // J. Geophysical Res. 1997. V. 102(C3). P. 5733–5752.
6. **Grisouard, N.** Numerical simulations of the local generation of internal solitary waves in the Bay of Biscay / N. Grisouard, C. Staquet // Nonlin. Processes Geophys. V. 17. 2010. P. 575–584
7. **Boegman, L.** Three-dimensional simulation of NLIW generation, propagation and breaking in

- Sayuga Lake / L. Voegman, A. Dorostkar // 7th Int. Symp. on Stratified Flows. 2011. P. 1–8.
8. **Лабай, В.С.** Состав, структура и сезонная динамика макробентоса озера Тунайча (Южный Сахалин) / В.С. Лабай, М.Г. Роготнев // Чтения памяти В.Я. Леванидова. 2005. В. 3. С. 62–94.
9. **Заварзин? Д.С.** Некоторые вопросы сезонной динамики зоопланктона озера Тунайча (Южный Сахалин) на современном этапе // Чтения памяти В.Я. Леванидова. 2005. В. 3. С. 95–105.

*Дата поступления
в редакцию 26.12.2013*

A.I. Zaytsev^{1,3}, S.V. Semin^{2,4}, I.S. Kostenko^{1,2}

NATURAL MEASUREMENTS AND NUMERICAL MODELING OF HYDROLOGICAL PARAMETERS OF TUNAICHA LAKE

Special Research Bureau for Automation of Marine Researches Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia¹
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev²,
Institute of Applied Physics Russian Academy of Science, Nizhny Novgorod³
University of Southern Queensland, Toowoomba, Australia⁴

Purpose: studying of water exchange between Tunaicha lake with the Okhotsk sea. Search of ways of improvement of water exchange in the lake.

Scientific approach: development of autonomous probing measuring system with use AANDERAA sensors. Measurement of hydrological parameters of water in the set horizons in northern part of Tunaicha lake. Using data of measurements was done numerical modeling of distribution of sea water in the lake by means of the program MITgcm complex. The analysis of results of supervision and numerical modeling is carried out.

Result: with use numerical modeling data, was prepared distribution of hydrological parameters throughout four tidal cycles. The analysis showed that the maximum speeds of a current are observed in a lake bottleneck (the smallest distance between coast and smaller depths in comparison with other part of the lake); temperature on a surface around a bottleneck of the lake is 2-3 degrees lower, than on the next sites; the increase in salinity in this place is observed. It can show about lifting of deep layers of water in this area.

Novelty: as a result of carrying out measurements was taken hydrological parameters in the thickness of liquid from a surface to the bottom in the set horizons unique data for this area, many of which are obtained for the first time. With use numerical modeling was received distribution of salinity, temperature and speeds of currents that will be used for understanding of features of circulation of waters in the lake and its water exchange with the sea.

Key words: the autonomous probe measurement system, Tunaicha lake, the center of the collection and processing of data, numerical modeling.