

УДК 551.465

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОХАЛИННОЙ СТРУКТУРЫ И ВОДООБМЕНА В ОЗЕРЕ ИССЫК-КУЛЬ

© 2020 г. П. О. Завьялов^{1, *}, А. С. Ижицкий¹, Г. Б. Кириллин²,
В. Ю. Резвов³, С. А. Алымкулов⁴, К. М. Жумалиев⁴, А. К. Курбаниязов^{5, 6}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Институт водной экологии и внутреннего рыбоводства, Берлин, Германия

³Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

⁴Международный университет инновационных технологий, Бишкек, Кыргызстан

⁵Международный казахско-турецкий университет им. А. Ясави, Туркестан, Казахстан

⁶Каспийский университет технологий и инжиниринга им. Ш. Есенова, Актау, Казахстан

*e-mail: peter@ocean.ru

Поступила в редакцию 12.11.2019 г.

После доработки 12.11.2019 г.

Принята к публикации 16.12.2019 г.

Выполненные в течение 4-х лет натурные измерения позволили установить ранее не известные особенности термохалинных полей и циркуляции озера Иссык-Куль. Построены наиболее подробные за всю историю наблюдений карты распределений солёности. Обнаружена область слабоповышенной солёности в центральной части озера, специфическая “дипольная” форма которой указывает на существование в структуре циркуляции не только общего циклонического круговорота, но и двух отдельных круговоротов меньшего, суббассейнового масштаба. Вообще говоря, поля солёности в Иссык-Куле отличаются необыкновенной консервативностью — ее межгодовые и сезонные изменения измеряются лишь сотыми долями промилле. Важным результатом представляется обнаружение сохраняющегося от года к году подповерхностного максимума солёности на глубинах от 70 до 130 м. Как было показано в нашей работе [27] на основе косвенных оценок, а теперь подтверждено и анализом прямых измерений скорости течений, осенне-зимнее дифференциальное охлаждение приводит к тому, что по древним речным руслам в восточном литоральном районе в придонные слои центральной части моря поступает значительный объём холодных прибрежных вод, опреснённых материковым стоком. Эти воды затем должны перемешиваться с лежащими выше более солёными водами, что, по нашей гипотезе, в ситуации, когда верхний слой озера также опреснен речным стоком, и приводит к появлению максимума солёности на промежуточных глубинах. Выполненные измерения не подтверждают проявлений глобального потепления в виде междекадного роста температуры в глубоких слоях озера Иссык-Куль, о котором сообщалось ранее: современное значение температуры на глубине 500 м в точности совпадает с отмеченным в измерениях 2003 г., а именно 4.44°C. Однако можно указать на очень слабое (около 0.03 г кг⁻¹) увеличение солёности придонного слоя за последние 40 лет.

Ключевые слова: озеро Иссык-Куль, термохалинная структура, циркуляция, осенне-зимнее выхолаживание

DOI: 10.31857/S0030157420020136

1. ВВЕДЕНИЕ

По своим размерам и глубине, степени влияния на региональный климат, экономическому значению озеро Иссык-Куль вполне может сравниться с морем. Озеро протянулось с запада на восток почти на 200 км, а объём его вод составляет более 1700 км³, что в 6 раз больше объёма вод Азовского моря или немногим менее половины объёма Белого моря. Озеро оказывает существенное воздействие на климатические характеристики

окружающих территорий: зимние температуры здесь на 3–5°C выше, чем на остальной территории Республики Кыргызстан, а летние — примерно на столько же ниже. Смягчающее влияние водоема проявляется и на межгодовых и междекадных масштабах — так, увеличение средней температуры воздуха в ходе глобального потепления в Иссык-Кульской области почти вдвое меньше, чем по Кыргызстану в целом [13].

Иссык-Куль играет важную роль в экономике Кыргызстана. Несмотря на относительно низ-

кую биологическую продуктивность (см., например, [1, 7]), озеро сохраняет определенную рыбопромысловую ценность, хотя уловы рыбы в последние десятилетия существенно снизились по сравнению с 1970 и 1980 гг, когда они достигали 1500 т в год, и на берегах озера были построены два крупных рыбоконсервных комбината. В то время Иссык-Куль имел также существенное транспортное значение: с помощью судов производилась перевалка грузов, в первую очередь угля, от железнодорожной станции г. Рыбачье (ныне г. Балыкчи) в западной части озера в областной центр г. Пржевальск (ныне г. Каракол) в восточной, где нет железной дороги. К настоящему времени грузооборот на данном маршруте упал почти до нуля, однако и сегодня на Иссык-Куле существует достаточное оживленное судоходство, связанное, в основном, с обслуживанием туристов. Именно рекреационное и туристическое значение озера особенно велико. По данным новостного портала [14], курорты Иссык-Куля в 2018 г. посетили более 900 000 отдыхающих не только из Кыргызстана, но и из соседних государств Средней Азии, России и дальнего зарубежья. При этом рекреационный потенциал Иссык-Куля далеко не исчерпан – уже на ближайшее десятилетие имеются планы увеличения потока туристов до полутора миллионов в год, а потом и более.

Озеро Иссык-Куль представляет общий научный интерес еще и в связи с тем, что его донные отложения хранят информацию об изменениях климата континентальной Евразии в течение миллионов лет. Именно внутриконтинентальное расположение озера вдали от океана имеет тут большое значение, поскольку палео-реконструкции, основанные на морских осадках, не всегда дают верную информацию о климате во внутренних областях материков [см., например, 18]. Поэтому в последние годы на международном уровне активно обсуждается возможность организации на Иссык-Куле глубокого бурения на 1000–1500 м с целью получить колонки, обеспечивающие реконструкцию климата на несколько гляциальных циклов (200–300 тыс. лет) при разрешении порядка нескольких десятилетий [20, 25]. Отмечалось, в частности, что для определения наиболее перспективных точек бурения и корректной интерпретации результатов эксперимента необходимо хорошо понимать особенности гидрологии Иссык-Куля и закономерности процессов переноса осадочного материала в водной толще озера.

Озеро Иссык-Куль привлекало внимание исследователей на протяжении столетий [19], однако целый ряд важных вопросов гидрофизического

режима Иссык-Куля пока остаются открытыми. Периодом расцвета научно-исследовательских работ на озере Иссык-Куль стала вторая половина прошлого века, когда гидрофизические, гидрохимические и гидробиологические исследования на озере и его притоках проводились целым рядом научных организаций СССР и был накоплен значительный объем научной информации о гидрологическом состоянии озера и составляющих его водного баланса (см., например, обобщающие работы [4–6]). К сожалению, после распада Советского Союза систематические исследования озера почти прекратились. Исключение составляют несколько международных проектов, осуществленных с помощью иностранных организаций. Так, в 1997 и 1998 гг. в ходе совместных экспедиций с участием специалистов из Бельгии, Франции, России и Киргизии было выполнено сейсмическое зондирование дна озера, а также отобраны несколько десятков колонок донных отложений [8, 11]. По результатам гидрохимических исследований начала 2000-х гг опубликованы работы [15, 16]. Однако гидрофизические характеристики озера остались почти не затронутыми этими исследованиями. Этот пробел был отчасти восполнен лишь в 2001 г, когда группа швейцарских ученых с участием местных специалистов провела на Иссык-Куле две больших экспедиции [12, 21], были выполнены в общей сложности 179 STD-зондирований по всей акватории озера. После этого подобные измерения не повторялись вплоть до наших экспедиций 2015–2017 гг., результаты которых и являются предметом настоящей статьи.

Таким образом, хотя научные исследования Иссык-Куля имеют долгую историю, в части гидрологии и гидрофизики изученность озера в значительной мере остановилась на уровне приборных и методических возможностей 80-х гг. прошлого века. Особенно это относится к измерениям солености, которым в данной статье мы уделим особое внимание, а также скорости течений. Существует основанное на единичных измерениях (3 краткосрочные буйковые постановки 1978–1979 гг. и даже запуск специальных почтовых карточек в качестве дрейфтеров [5]) и косвенных расчетах общее представление о циклоническом характере циркуляции в поверхностном слое, но практически ничего не известно о суббассейновых круговоротах и роли мезомасштабных структур, особенностях прибрежной и абиссальной циркуляции, закономерностях конвективного перемешивания водоема. Даже сведения о максимальной глубине озера в современных литературных публикациях противоречивы. Так, карта Генерального штаба издания 1978 г. указы-

вает 663 м, в работах [8] и [11] приводится значение 668 м, а в ряде других публикаций [например, 7], а также во многих источниках в Интернете, включая русскоязычную Википедию – значение 702 м. С нашей точки зрения, наиболее обоснованной является глубина 668 м.

Один из ключевых открытых вопросов состоит в следующем: какие механизмы обеспечивают быстрое перемешивание водной толщи озера, и какую роль в этом играют особенности подводного рельефа? Многие имеющиеся данные указывают на то, что вертикальный обмен в Иссык-Куле происходит чрезвычайно интенсивно. Об этом свидетельствует, в частности, насыщенность кислородом всей толщи вод вплоть до максимальных глубин. По оценкам работы [12], авторы которой проанализировали концентрации трассеров SF_6 , 3H - 3He и CFC-11 и CFC-12 в придонном и поверхностном слоях, время полного обновления абиссальных вод в Иссык-Куле не превышает 11 лет. Некоторые авторы [17] приписывают это действию сильных ветров, однако с этим трудно согласиться. Ветровое турбулентное перемешивание в Иссык-Куле, как и во всяком другом водоеме, в основном ограничивается пределами верхнего квазиоднородного слоя. Поэтому естественно возникает вопрос: за счет чего процессы вертикального обмена во всей толще вод Иссык-Куля протекают столь эффективно?

Авторы работы [21] выдвинули гипотезу, центральную роль в которой играют особенности донного рельефа, в частности, речные палеорусла в восточном литоральном районе озера. Известно, что в позднем плейстоцене уровень Иссык-Куля был почти на 100 м. ниже нынешнего (см., например, [10]). В то время сегодняшние мелководья в восточной части озера были сушей, по которой текли реки, ныне известные как Джергалан и Тюп. Они оставили на дне прекрасно сохранившиеся на протяжении десятков километров русловые каньоны шириной до 1 км, заглубленные на 20–70 м по отношению к окружающему ровному донному ландшафту, которые непосредственно соединяются с глубокой частью озера [22]. Согласно гипотезе [21], перемешивание озера в сезонных временных масштабах начинается осенью с дифференциального охлаждения, когда вода на восточных (как, впрочем, и на западных) мелководьях остывает до значительно более низких температур, чем в глубокой части Иссык-Куля. Далее вследствие плотностной конвекции эта холодная вода опускается в каньоны древних речных русел, по которым как по своеобразным водоводам и стекает в глубокую часть озера и погружается там на свой изопикнический уровень в абиссальных слоях.

Авторы изложенной выше гипотезы выдвинули ее на основе качественных соображений, исходя из анализа вертикальных профилей температуры и солености в глубокой части озера, на которых видны очень слабо выраженные особенности интрузионного характера, возможно (по предположению этих авторов), связанные с латеральной адвекцией литоральных вод из района древних русел. Прямые измерения в русловых каньонах никогда ранее не выполнялись.

Механизмы перемешивания в большой мере определяют отклик крупных озер на происходящие климатические изменения [3]. Известно, что эффекты этих изменений привели к существенному потеплению и аридизации климата Кыргызстана [13]. Как это отразилось на гидрофизическом состоянии водной массы Иссык-Куля? Вопрос этот остается пока открытым. По сообщениям авторов статьи [25], в период с 1983 по 2003 гг. наблюдалось потепление воды в придонном слое почти на $0.5^\circ C$. После 2003 г. измерения отсутствовали.

В 2014 г. Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН совместно с Институтом физических проблем и материаловедения АН Республики Кыргызстан и рядом других местных научных организаций была начата программа исследований современного состояния озера Иссык-Куль. В рамках этой программы к настоящему времени были выполнены 5 экспедиций. Экспедиция 2014 г. имела рекогносцировочный характер и была ограничена небольшим прибрежным районом, а экспедиции 2015–2018 гг. охватывали всю акваторию озера. Кроме того, были выполнены долгосрочные постановки заякоренных станций, оснащенных гирляндами термодатчиков и измерителями скорости течения, в том числе и в каньонах древних речных русел в восточном литоральном районе. Информация о современной литоральной термохалинной структуре озера была частично опубликована в нашей статье [27]. Данные зондирования и долгосрочных заякоренных измерений скорости течений ранее не обсуждались.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данные, использованные в этом исследовании, были собраны в 4-х последовательных организованных Институтом океанологии РАН совместно с кыргызскими коллегами экспедициях НИС “Молтур”, принадлежащего МЧС Кыргызстана. Первая экспедиция выполнена с 23 июня по 27 июня 2015 г., вторая – с 31 октября по 3 ноября 2016 г., третья – с 25 июня по 1 июля 2017 г., четвертая – с 4 по 7 июля 2018 г. Ежегодные STD-зондирования и отбор проб воды в 2015–

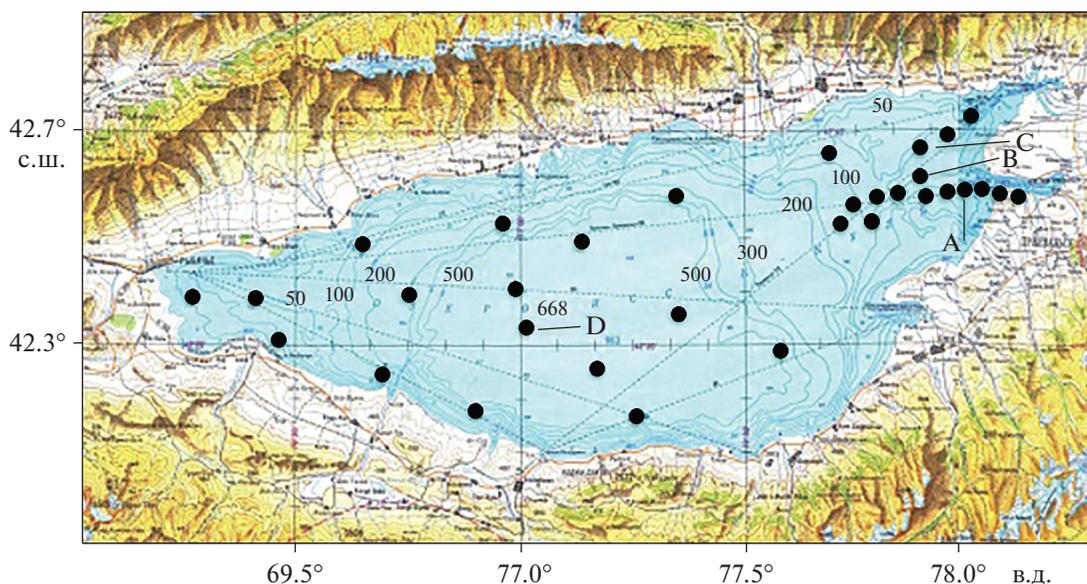


Рис. 1. Карта озера Иссык-Куль (издание Генерального штаба 1988 г, лист К-43-6) с изолиниями глубины (м) и сетка ежегодно выполнявшихся в 2015–2017 гг. гидрологических станций (черные кружки). Буквами А, В и С обозначены точки заякоренных постановок с цепочками термодатчиков и измерителями скорости течения. Станции А и С были установлены в русловых каньонах Джергалан и Тюп соответственно, а станция В – на ровном дне между каньонами. Буквой D обозначена гидрологическая станция, соответствующая максимальной глубине озера 668 м.

2017 гг были проведены в 34 точках, распределенных по всей акватории озера (рис. 1). В 2018 г. схема расположения станций была несколько иная. Она будет отдельно показана на рис. 4.

Всего было получено 75 профилей STD-зонда. В 2015 г. использовался мелководный STD-зонд YSI6600, поэтому профилирование в этом исследовании ограничивалось самой верхней частью (около 70 м) толщи воды. В экспедициях 2016–2018 гг. использовался профилограф SeaBird SBE19plus, позволяющий проводить глубокие зондирования. Согласно спецификациям производителя, профилограф имеет точность 0.005°C и 0.0005 См/м и разрешение 0.0001°C и 0.00005 См/м соответственно по температуре и электропроводности. В ходе экспедиции 2016 г. выполненные измерения включали в себя также непрерывные зондирования температуры и электропроводности в поверхностном слое вдоль траектории судна с использованием системы прокачки забортной воды и STD-зонда YSI6600, помещенного в специальный проточный контейнер на палубе, что обеспечивало горизонтальное разрешение вдоль трека судна порядка 100 м.

Необходимо отметить, что преобразование основанных на электропроводности данных STD-зонда в истинную соленость для озера Иссык-Куль (как и для других соленых озер, см., например, [2, 26]) является отдельной проблемой из-за существенных отличий ионно-солевого состава

вод озера от “канонического” состава воды океана. Полученная на основе лабораторных измерений эмпирическая формула для восстановления солености воды Иссык-Куля из электропроводности, температуры и давления была предложена в работе [21], но с тех пор никем не более использовалась. В данной работе мы использовали эту формулу, чтобы получить истинную соленость.

В экспедиции 2018 г. также впервые получены вертикальные распределения направления и скорости течения посредством зондирований с использованием акустического зонда Seaguard, частота измерений 2 Гц.

Кроме того, три заякоренные станции, оснащенные цепочками термисторов и измерителями скорости течения, были установлены 1 ноября 2016 г., а затем подняты 27 марта 2017 г.. Таким образом, станции работали в течение 147 сут, регистрируя температуру воды на различных уровнях глубины с дискретностью 1 мин, а также скорость течения у дна с дискретностью 15 мин. На южной заякоренной станции, установленной в древнем русле реки Джергалан, где общая глубина составляла 51 м, тринадцать датчиков температуры RBR TR-1060 были установлены на глубинах 1, 6, 12, 16, 20, 24, 29, 32, 38, 42, 46, 48 и 49 м и один датчик температуры и давления RBR TDR-2050, а также инклинометрический измеритель течения SeaHorse – на глубине 50.7 м. На северной станции в древнем русле реки Тюп на глуби-

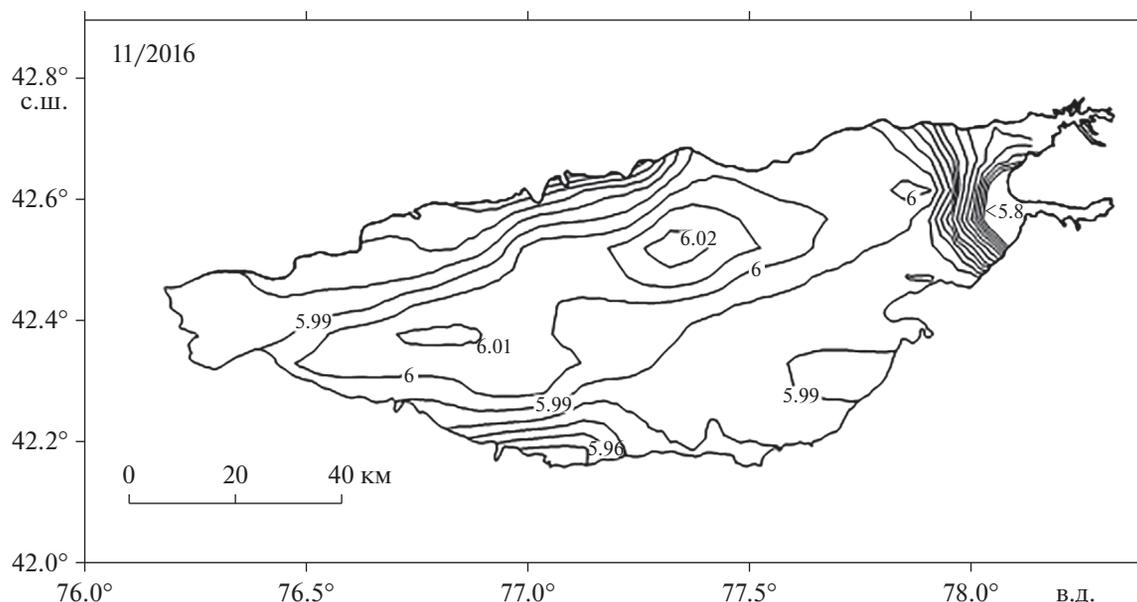


Рис. 2. Пространственное распределение солености (г/кг) на поверхности 1–3.11.2016 г.

не 50 м четыре термистора RBR TR-1060 были установлены только в нижней части водной колонны, на уровнях 20, 30, 40 и 50 м. На высоте 0.5 м от дна был установлен также измеритель скорости течения SeaHorse. Наконец, на контрольной заякоренной станции между двумя руслами, на глубине 23.5 м были установлены три датчика температуры RBR TR-1060 на уровнях 3, 10, 17 м и один датчик RBR TDR-2050 и измеритель скорости течений SeaHorse на глубине 23 м. Перед установкой станций проводилось батиметрическое картирование с использованием двухлучевого эхолота FortXXI-Scat300 для получения детальной топографии дна. При анализе результатов измерений использовались также данные реанализа ERA-Interim [9] по температуре воздуха.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Горизонтальная халинная структура и ее изменчивость. Распределение солености на поверхности, полученное по результатам проточных STD-измерений в ноябре 2016 г., показаны на рис. 2. Данная карта, насколько нам известно, является наиболее подробной из всех когда-либо полученных на Иссык-Куле. В целом, горизонтальная изменчивость поля солености оказалась удивительно малой — за исключением районов, непосредственно примыкающих к устьям рек, общий разброс значений солености по всему поверхностному слою озера не превышал 0.06 г кг^{-1} (между 5.96 и 6.02 г кг^{-1}). Это еще раз свидетель-

ствует о высокой интенсивности процессов перемешивания в озере.

Тем не менее, сток главных притоков Иссык-Куля, рек Джергалан и Тюп, приносящих в озеро в среднем $28 \text{ м}^3/\text{с}$ и $12 \text{ м}^3/\text{с}$ [5] пресной воды, формирует отчетливый отклик в поле солености в восточном литоральном районе, образуя своего рода фронтальную зону с достаточно высоким градиентом солености (порядка 0.02 г кг^{-1} на км) около 78° в.д. Материковый плюм с относительно низкой соленостью преследуется на протяжении более 20 км от речных устьев и в основном ограничивается верхним 20-метровым слоем. Этот плюм в осенне-зимний период характеризуется также температурой, пониженной на $1\text{--}2^\circ\text{C}$ относительно окружающих вод. На инфракрасных спутниковых изображениях, полученных одновременно с натурными измерениями (см. [27]) видно, что наиболее холодная вода сосредоточена в относительно узкой полосе шириной $1\text{--}4$ км, прилегающей к суше и простирающейся от устья р. Джергалан до устья р. Тюп. Именно здесь осенью и развивается дифференциальная конвекция, обсуждаемая ниже.

Другая примечательная особенность представлена слегка (на $0.01\text{--}0.02 \text{ г кг}^{-1}$) повышенными значениями солености и пониженными температуры в центральной части озера, что согласуется с традиционным представлением о циклонической циркуляции бассейнового масштаба, приводящей к формированию в центральной области “куполообразной” структуры и поступлению более соленых вод из термоклина в поверхностный

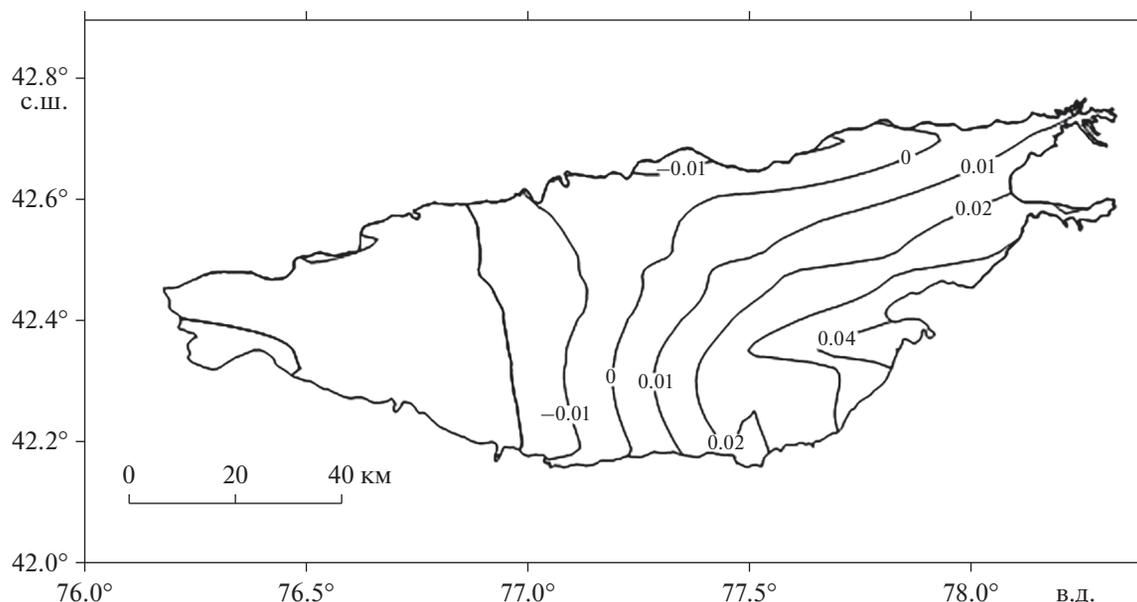


Рис. 3. Разница между значениями солёности (г кг^{-1}) на поверхности в конце июня 2017 г. и в конце июня 2015 г.

слой (см., например, [5]). Интересно отметить, что эта область повышенной солёности и пониженной температуры, по-видимому, имеет бимодальную структуру, с одним ядром в центральной северо-восточной части и другим — в центральной юго-западной части озера. Это может указывать на существование двух циклонических круговоротов суббассейнового масштаба, наложенных на общую циклоническую циркуляцию. Такие суббассейновые круговороты часто встречаются в замкнутых морях и водоёмах, таких, например, как Чёрное и Каспийское моря (например, [24]), но они никогда ранее не были описаны для Иссык-Куля. Данные прямых измерений скорости течений в июле 2018 г в целом подтверждают существование суббассейновых круговоротов, см. раздел 3.2 ниже.

Для 2015 и 2017 гг. доступные данные о солёности и температуре ограничены гидрографическими станциями, поэтому информация о горизонтальных распределениях менее детальна. В целом, в интерполированных полях поверхностной солёности наблюдались закономерности, сходные с характеристиками 2016 г., а именно, очень ограниченный (не более 0.06 г кг^{-1}) диапазон пространственной изменчивости по всей площади озера (за исключением области влияния речного стока в восточном литоральном районе), и небольшой, но отчетливый максимум солёности в центральной части озера.

Межгодовые изменения солёности невелики, они нигде не превышали нескольких сотых г кг^{-1} и в среднем по всей акватории были очень близки

к нулю (рис. 3). Таким образом, вариации речного стока почти не оказывают влияния на распределения солёности даже в верхнем слое.

3.2. Результаты измерений скорости в июле 2018 г.

Пространственные распределения скорости течений измерялись только в четвертой экспедиции 4–5 июля 2018 г., в условиях умеренных ($3\text{--}5 \text{ м с}^{-1}$) ветров западных и юго-западных румбов, затем сменившихся на юго-восточные. Результаты измерений представлены на рис. 4. На этом рисунке векторы скорости на каждом уровне глубины показаны в горизонтальной плоскости (ось абсцисс соответствует зональному, ординат — меридиональному направлению). Наиболее высокие скорости (до 38 см с^{-1}) наблюдались на мелководных станциях в прибрежных районах, где изменчивость направления течений определялась в основном местным ветром. В глубокой части озера течения были более медленными. Интересно отметить, что на всех станциях скорость и направление течений мало менялись по глубине. Даже на самых глубоких станциях (18bis и 19) мы не наблюдали никаких признаков смены знака циркуляции в придонном слое — течение сохраняло одно и то же направление по всей толще вод, лишь незначительно убывая по абсолютной величине по направлению ко дну. Такая ситуация возможна в случае преимущественно баротропного характера движения — за исключением мелководных литоральных районов, где преобладают дрейфовые эффекты, течения управляются не ветровым дрейфом и не горизонтальными неоднородностями плотности (которые, как видно из изложенно-

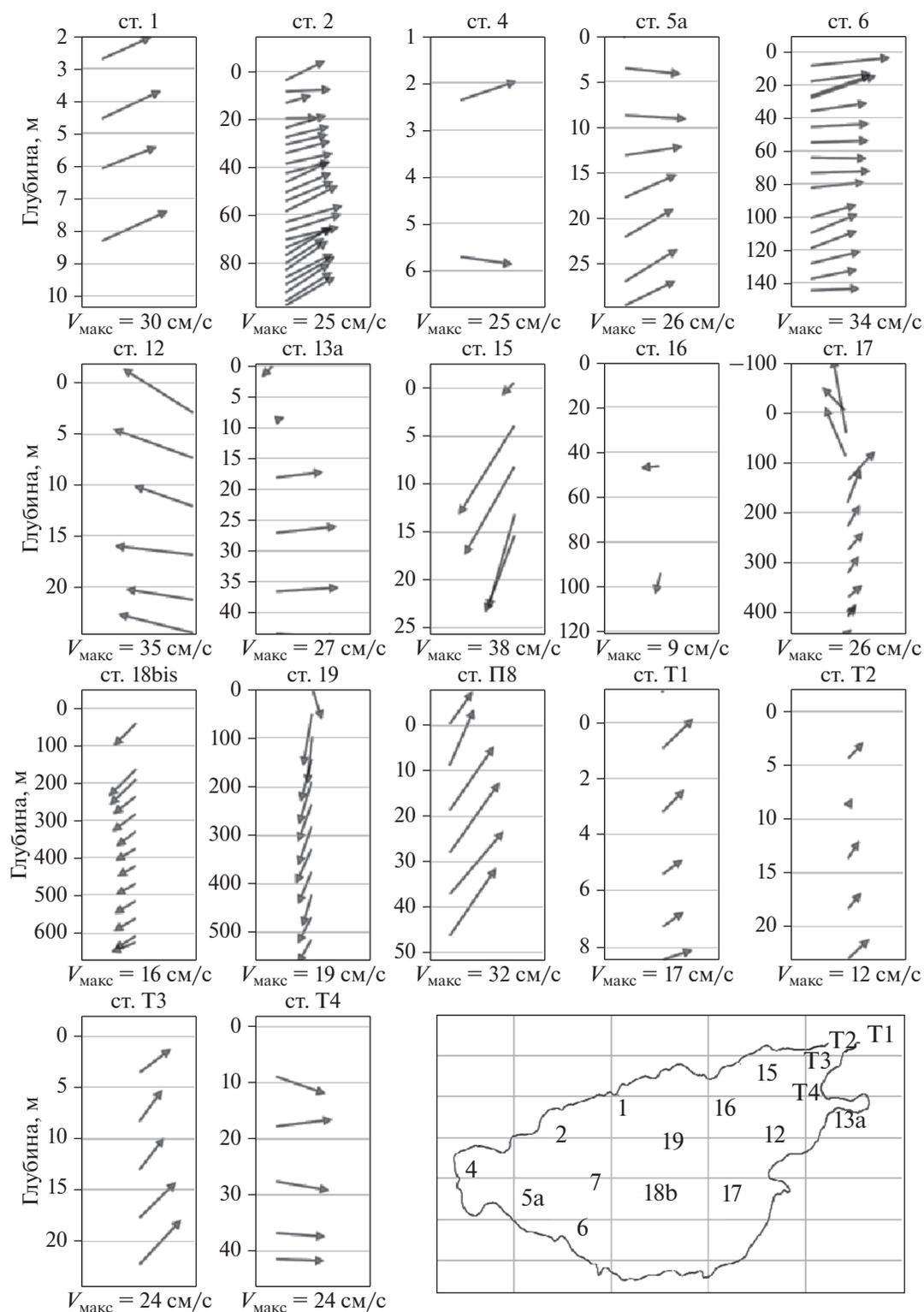


Рис. 4. Вертикальные распределения векторов скорости течений 4–5.07.2018 г. Векторы на каждом уровне глубины показаны в горизонтальной плоскости (ось абсцисс соответствует зональному, ординат – меридиональному направлению). Номера станций показаны над графиками, масштаб максимальной скорости – под графиками. В правом нижнем углу дана схема расположения станций.

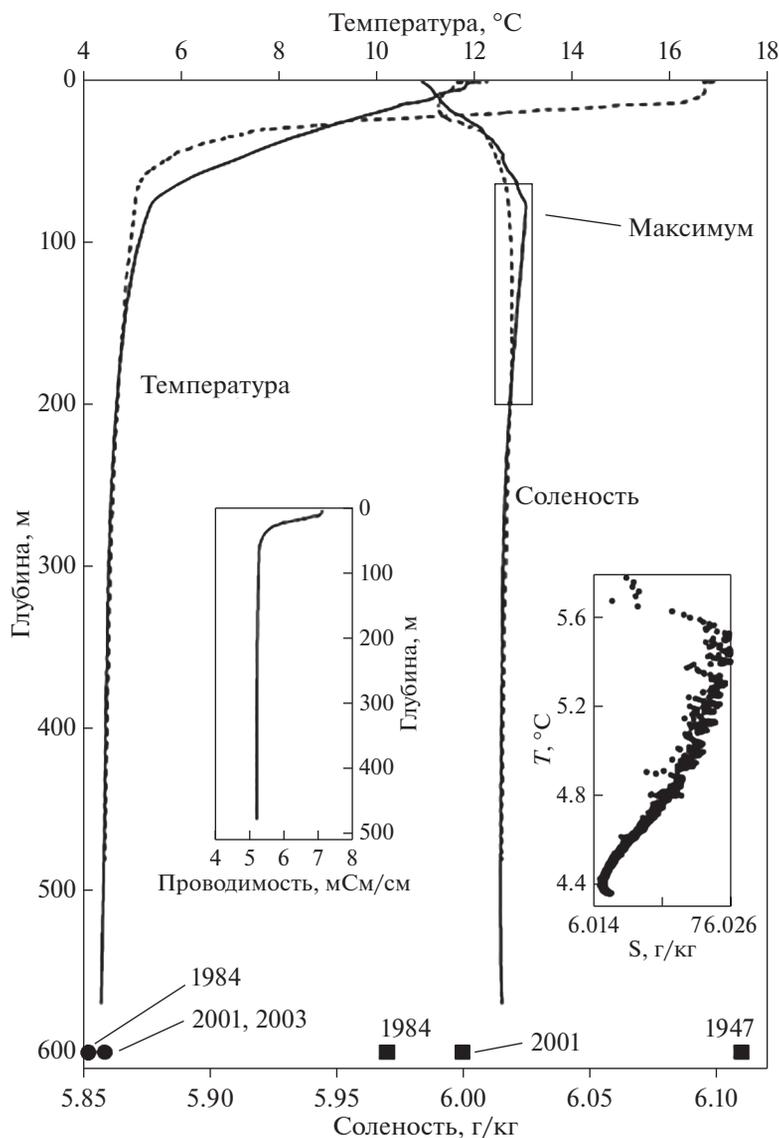


Рис. 5. Вертикальные профили температуры и солёности по данным зондирований в июне 2016 г. (пунктир) и в ноябре 2017 г. (сплошная линия), а также профиль электропроводности и TS-диаграмма для ноября 2017 г. Также показаны имеющиеся в литературе исторически данные по температуре (кружки) и солёности (квадратики) в придонном слое.

го выше, в озере Иссык-Куль вообще относительно малы), а наклонами поверхности водоема, связанными, вероятно, с завихренностью поля ветра над акваторией.

Если исключить из рассмотрения прибрежные районы и оставить лишь те станции, глубина на которых превышает 100 м (т.е. расположенные на континентальном склоне либо в глубокой части озера), а также перейти к осредненным по глубине векторам скорости, получим, что измерения не противоречат нашему представлению о наличии двух циклонических круговоротов суббассейнового масштаба, тем более что предполагаемые

центры этих круговоротов довольно точно совпадают с областями повышенной солёности, обнаруженными в измерениях 2016 г., см. рис. 2.

3.3. Вертикальная термохалинная структура и ее изменчивость. Вертикальная структура температуры и солёности, наблюдавшаяся 31 октября 2016 г. и 29 июня 2017 г. в самой глубокой части Иссык-Куля (станция, отмеченная литерой D на рис. 1) показана на рис. 5. На рисунке также показаны соответствующие исторические данные из литературных источников. Наши вновь полученные данные свидетельствуют о том, что значительное междекадное потепление глубоких вод

озера (около 0.5°C за период 1983–2003 г., по данным работы [23]), по-видимому, прекратилось, поскольку современная температура в настоящее время остается точно такой же, какой была в 2003 г. (а именно, 4.44°C на глубине 500 м). Однако отмечен небольшой положительный тренд солености в глубинных водах: на глубине 500 м она увеличилась примерно на 0.05 г кг^{-1} с 1984 г. и примерно на 0.02 г кг^{-1} с 2001 г. и составляет в настоящее время 6.02 г кг^{-1} . Впрочем, согласно литературным данным [4], в более отдаленном прошлом в 1947 г минерализация придонного слоя достигала 6.11 г кг^{-1} , что примерно на 0.09 г кг^{-1} выше, чем в 2017 г.

Современные вертикальные распределения температуры (рис. 5) характеризуются довольно резким термоклинном, где температура падала примерно с 12°C в ноябре 2016 г. и 17°C в июне 2017 г. у поверхности до 5°C в обоих случаях на глубине 80 и 60 м соответственно. Межгодовые различия практически полностью исчезают на глубинах ниже 180 м. Далее ко дну температура незначительно снижается до 4.44°C на глубине 500 м и 4.37°C на глубине 570 м.

Что касается вертикальных профилей солености, прежде всего необходимо отметить, что диапазон изменений солености по вертикали весьма мал – все измеренные значения находятся в интервале шириной менее 0.07 г кг^{-1} в диапазоне от 5.960 до 6.026 г кг^{-1} . В 2016 г. соленость увеличивалась с 5.960 г кг^{-1} на поверхности до 6.026 г кг^{-1} на глубине 81 м, а затем снижалась ко дну до 6.015 г кг^{-1} на уровне 570 м. В 2017 г. соленость сначала снижалась от примерно 5.996 г кг^{-1} на поверхности до минимума 5.990 г кг^{-1} на верхней границе термоклина на глубине 15.5 м, а затем увеличивалась до максимального значения 6.019 г кг^{-1} на глубине около 125 м. От этой глубины в направлении ко дну соленость очень медленно снижалась до 6.015 г кг^{-1} на максимальной в этом измерении глубине 481 м.

Таким образом, в наших измерениях впервые обнаружено существование очень слабого, но уверенно наблюдаемого максимума солености на промежуточных глубинах ниже термоклина. Этот максимум слишком мал по величине, чтобы его можно было обнаружить методами, использовавшимися в советский период исследований озера Иссык-Куль, поэтому о нем никогда ранее не сообщалось. Однако его величина (от 0.004 до 0.011 г кг^{-1}) намного выше инструментальной неопределенности STD-измерений. Последняя может быть оценена из технических характеристик прибора и использовавшейся конверсионной формулы Питерса как примерно 0.001 г кг^{-1} . Про-

межуточный максимум солености, по-видимому, является постоянной и устойчивой особенностью вертикальной термохалинной структуры Иссык-Куля – подобное распределение солености можно видеть и в данных 2001 г., представленных в [21], хотя авторы этой работы и не обсуждали данный вопрос. В их наблюдениях глубина максимума варьировалась от 200 до 300 м, а затем ниже этого слоя соленость снижалась примерно на 0.002 г кг^{-1} по направлению ко дну.

Наблюдаемые инверсии солености малы по величине и не оказывают существенного влияния на плотность по сравнению с эффектом температурной стратификации, поэтому толща вод остается конвективно устойчивой (см. [27]). Возможные динамические причины формирования промежуточного максимума солености под термоклинном будут обсуждены ниже.

3.4. Изменчивость температуры в палео-руслах рек в восточном литоральном районе и вне их в период осенне-зимнего выхолаживания. Данные заякоренных цепочек термисторов, установленных 1 ноября 2016 г. и поднятых 27 марта 2017 г., дают представления о том, как происходит зимнее выхолаживание на восточных мелководьях озера. Как упомянуто выше, две станции были установлены в палео-руслах рек Джергалан и Тюп и одна – на шельфе между ними. На основе полученных данных можно отметить постепенное общее охлаждение с примерно 13°C в начале ноября до около 3°C в конце февраля–начале марта, после чего в середине марта началось весеннее потепление. Фрагмент данных, соответствующий отрезку времени с 1 января по 1 февраля, представлен на рис. 6. Видно, что охлаждение не является непрерывным, а представляет собой последовательность большого числа отдельных событий монотонного понижения температуры продолжительностью от 1–2 до нескольких десятков минут. Эти события разделены между собой периодами постоянства или даже слабого роста температуры. Рассматривая вертикальную структуру, можно видеть, что некоторые из эпизодов охлаждения начинаются с поверхности, а затем распространяются вниз, вероятно, вследствие конвективного перемешивания. Напротив, другие события охлаждения (например, 3, 7, 17, 29 января на рис. 7) возникают сразу в нижнем слое при отсутствии столь же или более холодной воды в верхней части водной колонны и, следовательно, могут объясняться только латеральной адвекцией.

Для приведенного ниже количественного анализа данных цепочек термисторов мы определили событие придонного охлаждения как ситуацию, когда температура на самом нижнем датчике монотонно понижалась в течение серии

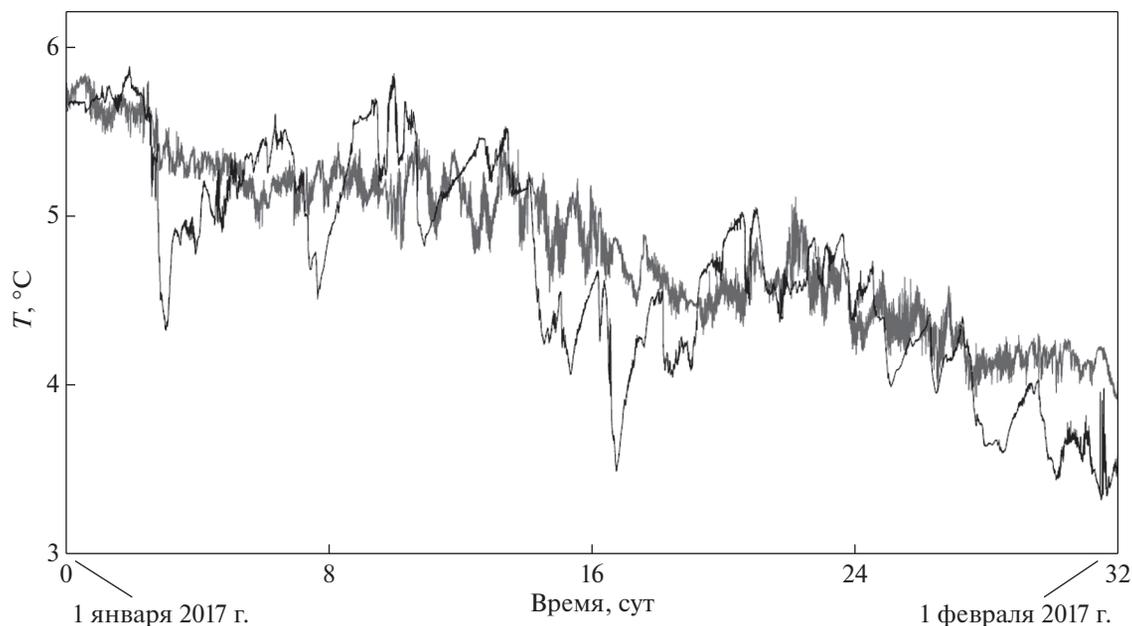


Рис. 6. Фрагмент записи заякоренных термисторов: изменения температуры воды на поверхности (серая кривая) и у дна на глубине 50.5 м (тонкая черная кривая) в январе 2017 г.

последовательных отсчетов. Поскольку период дискретизации данных в этих измерениях составлял 1 мин, рассматривались только события продолжительностью 2 мин и более. Далее, событие считалось “конвективным”, если в начале его температура на придонном датчике была выше, чем на следующем (считая от дна) датчике цепочки термисторов, и “адвективной” в противном случае. Так как наблюдаемые значения температуры во всех случаях были выше температуры максимальной плотности, которая составляет для воды Иссык-Куля около 2.75°C [5], а стратификация по солености в нижнем слое была крайне незначительной, ситуация инверсии температуры всегда предполагала конвективную неустойчивость. С другой стороны, отсутствие такой инверсии означает, что наблюдаемое снижение температуры во времени не может быть объяснено вертикальным теплообменом и, следовательно, должно быть связано с латеральной адвекцией.

Все данные, записанные заякоренными цепочками термисторов, были проанализированы описанным выше образом. Оказалось, что общая продолжительность охлаждения у дна в течение всего 147-суточного периода измерений была существенно разной для трех местоположений и составила 60780 мин (около 42 сут) для руслового каньона Джергалан, 104491 мин (около 73 сут) для руслового каньона Тюп и 95783 мин (около 67 сут) для ровного участка дна между руслами. При этом, в то время как на шельфе за пределами

каньонов конвективный и адвективный механизмы были ответственны за примерно равное количество событий охлаждения, внутри каньонов явно преобладал адвективный механизм, на который приходилось более 89% случаев охлаждения в придонном слое каньона Джергалан и около 66% всех событий охлаждения в каньоне Тюп. Кроме того, отмечено, что отдельные адвективные события охлаждения в русловых каньонах имели тенденцию длиться дольше, чем на ровном дне между каньонами (максимальная продолжительность — 41 мин против 19 мин), и вызывать более сильное падение температуры (максимальное значение — 1.36°C против 0.29°C). Эти результаты указывают на то, что воды, опустившиеся в донные слои в результате дифференциальной конвекции на восточных мелководьях в период осенне-зимнего выхолаживания, действительно могут переноситься в направлении глубокой части озера за счет адвекции в русловых каньонах.

3.5. Изменчивость придонных течений в палеорусле рек в восточном литоральном районе и вне их. Обратимся теперь к данным по скорости течения в придонном слое. Прежде всего, обращает на себя внимание тот факт, что скорости придонных течений в русловых каньонах оказались почти втрое выше, чем вне их. Так, среднее за весь период измерений значение скорости течения в каньоне Джергалан составило 3.87 см/с , в каньоне Тюп 4.25 см/с , а на ровном дне между руслами всего 1.42 см/с — при том, что глубина в каньонах

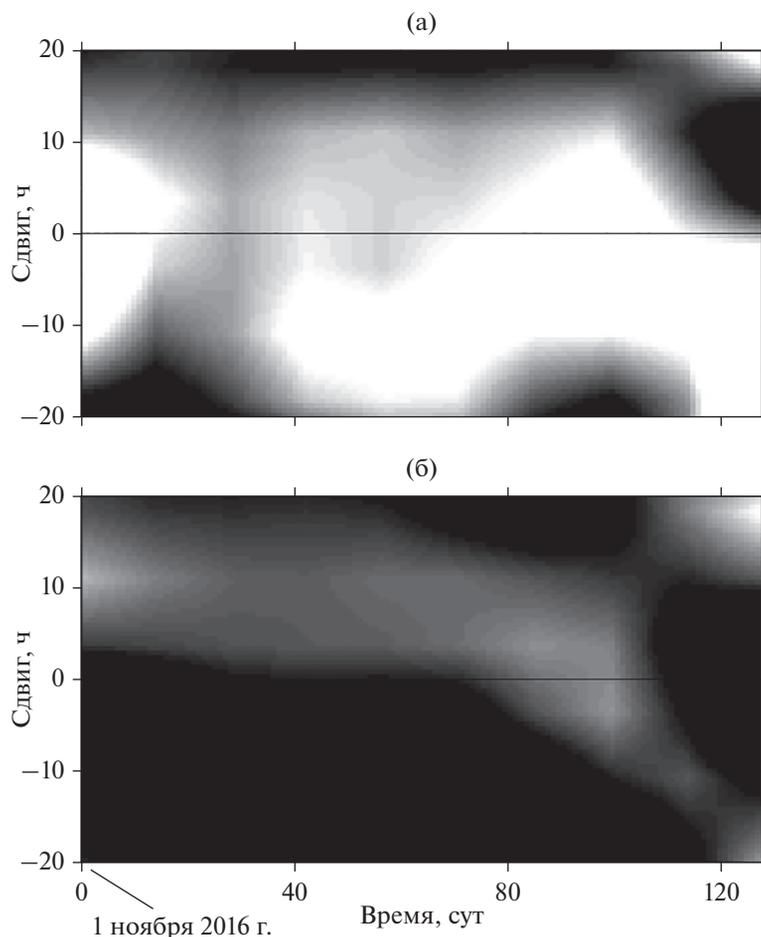


Рис. 7. Коэффициенты корреляции между изменениями скорости течения в каньонах Джергалан и Тюп (а) и в каньоне Джергалан и на плоском дне каньонами (б) в зависимости от времени и от временного сдвига (положительный знак сдвига в обоих случаях соответствует запаздыванию ряда данных из каньона Джергалан по отношению ко второму ряду). Белым цветом показаны корреляции, которые являются значимыми при данной ширине использованного корреляционного окна (144 члена ряда, $r > 0.21$), а оттенками серого и черного – незначимые корреляции ($r < 0.21$).

больше. Такое увеличение скорости с глубиной косвенно указывает на преимущественно плотностной, бароклинный характер движения в этом районе в период измерений: действительно, скорость дрейфового ветрового течения должна убывать с глубиной, а скорость баротропных течений от глубины не зависит. Положительные аномалии плотности могут зарождаться на мелководьях в “верховьях” русел за счет дифференциального осенне-зимнего охлаждения и затем передаваться вниз по руслам гравитационными течениями, что согласуется и с преобладанием в каньонах адвекции, как обсуждалось выше.

Результаты корреляционного анализа рядов скорости течения могут быть проиллюстрированы графиками на рис. 7. Рассматривались одновременные и сдвиговые корреляции между течениями в двух каньонах (рис. 7а) и между течениями в каньоне Джергалан и на ровном дне (рис. 7б)

при сдвигах от -20 до 20 часов в пределах движущегося по всему ряду окна шириной 38 часов. В отдельные периоды корреляции изменчивости скорости в каньонах Джергалан и Тюп достигали 0.95. Однако в целом преобладают невысокие значения коэффициента корреляции. Согласно критерию Стьюдента, при данной длине выборок в пределах корреляционного окна значимо отличными от нуля могут считаться коэффициенты корреляции, превышающие (по модулю) 0.21. Как видно из рис. 7, значимые корреляции между течением в каньоне и на окружающем ровном дне практически никогда не отмечались. Вместе с этим, течения в двух разных каньонах большую часть времени обнаруживают значимую корреляцию между собой при временных сдвигах от 0 до 10 часов (причем чаще всего изменения скорости в каньоне Джергалан опережают изменения в каньоне Тюп). Гипотетическая интерпретация это-

го факта такова: течения в обоих палеорулах “запускаются” одними и теми же событиями охлаждения на мелководьях в “верховьях” каньонов, обусловленными атмосферным форсингом. При этом фазовые сдвиги между рядами скорости, зарегистрированными на заякоренных станциях, могут быть связаны с разницей во времени, необходимого для того, чтобы сигнал достиг станций по двум разным руслам. Отсутствие же значимых корреляций со скоростью течений на ровном дне между каньонами может говорить о том, что воды, опустившиеся в придонный слой на мелководьях в результате конвекции при дифференциальном охлаждении, далее стекают по склону преимущественно именно в каньонах, а не на ровном дне.

4. ВЫВОДЫ

Выполненные в течение 4-х лет натурные измерения позволили установить ранее не известные особенности термохалинной структуры и циркуляции озера Иссык-Куль. Построены наиболее подробные за все время изучения озера карты распределений солёности. Показано, что поля солёности в Иссык-Куле отличаются удивительной консервативностью — ее межгодовые изменения измеряются лишь сотыми долями промилле. Эта ситуация возможна лишь в том случае, если вся толща вод перемешивается в сезонных и межгодовых масштабах достаточно интенсивно для того, чтобы межгодовая изменчивость стока могла нивелироваться перемешиванием последнего в гораздо большем объеме озерных вод.

Отмечена область слабоповышенной солёности в центральной части озера. Впервые обнаруженная “дипольная” форма этой области указывает на существование в структуре циркуляции не только общего циклонического круговорота, но и двух отдельных круговоротов суббассейнового масштаба. Это представление отчасти подтверждается и данными прямых измерений скорости. Отмечено также, что в наших измерениях скорость и направление течения были по глубине относительно однородны, то есть циркуляция имела преимущественно “однослойный” характер, а движение баротропно-эквивалентную природу.

Важной находкой нам представляется обнаружение сохраняющегося от года к году подповерхностного максимума солёности на глубинах от 70 до 130 м. Как было показано в нашей работе [27], а теперь подтверждено и анализом прямых измерений скорости течений, осенне-зимнее дифференциальное охлаждение приводит к тому, что по древним речным руслам в восточном литоральном районе в придонные слои центральной части

морья поступает объём порядка нескольких десятых км³ прибрежных вод, опресненных речным стоком. Этот объём затем должен перемешиваться с лежащими выше более солёными водами, что, по нашей гипотезе, и является причиной слабого убывания солёности ко дну в нижней части водной колонны. С другой стороны, приповерхностные слои также опреснены речным стоком, поступающим туда в теплое время года. Совместное проявление этих двух факторов и приводит к появлению максимума солёности на промежуточных глубинах.

Выполненные измерения не подтверждают проявлений глобального потепления в виде междекадного роста температуры в глубоких слоях озера Иссык-Куль, о котором сообщалось ранее: современное значение температуры на глубине 500 м в точности совпадает с отмеченным в измерениях 2003 г, а именно 4.44°C. Однако можно указать на очень слабое (около 0.03 г кг⁻¹) увеличение солёности придонного слоя за последние 40 лет.

Источник финансирования. Полевые исследования были поддержаны РФФИ (грант № 17-05-41043). Анализ данных был выполнен также при поддержке Министерства образования и науки РФ, тема Госзадания № 0149-2019-0003, и РНФ (грант № 18-47-06202).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антал Т.К. Исследование продукционных характеристик фитопланктона с помощью погружного флуоресцентного зонда. Дисс. на соиск. уч. ст. к.б.н., МГУ, биологический ф-т, М.: 2000.
2. Гертман И., Завьялов П.О. Новое уравнение состояния для Аральского моря // Океанология. Т. 51. № 3. 2011. С. 440–450.
3. Завьялов П.О., Арашкевич Е.Г., Бастида И. и др. Большое Аральское море в начале XXI века: физика, биология, химия. М.: Наука, 2012, 229 с.
4. Кадыров В.К. Гидрохимия озера Иссык-Куль и его бассейна. Фрунзе: Илим, 1986. 211 с.
5. Романовский В.В. Озеро Иссык-Куль как природный комплекс. Фрунзе: Илим, 1991. 164 с.
6. Шабунин Г.Д. 1984. Термический режим и динамика вод озера Иссык-Куль. Дисс. на соиск. уч. ст. к.г.н. Фрунзе. 197 с.
7. Alamatov A., Mikkola H. Is biodiversity friendly fisheries management possible on Issyk-Kul lake in the Kyrgyz Republic? // Ambio. 2011. V. 40(5), P. 479–495.
8. De Batist M., Imbo Y., Vermeesch P. et al. Bathymetry and sedimentary environments of Lake Issyk-Kul, Kyrgyz Republic (Central Asia): A large, high-altitude, tectonic lake / Eds. Klerkx J., Imanackunov B. // Lake Issyk-Kul: Its Natural Environment. Dordrecht (NATO Science Series, Kluwer). 2001. P. 101–123.

9. *Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J. et al.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Quat. J. Royal Meteorol. Soc.*, 2011. V. 137. P. 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
10. *Gebhardt C., L., Naudts L., De Mol L. et al.* High-amplitude lake-level changes in tectonically active Lake Issyk-Kul (Kyrgyzstan) revealed by high-resolution seismic reflection data // *Climate of the Past*. 2017. V. 13(1). P. 73–92. <https://doi.org/10.5194/cp-13-73-2017>
11. *Giralt S., Klerkx J., Riera S. et al.* 2002. Recent paleoenvironmental evolution of Lake Issyk-Kul. // Eds. Klerkx J., Imanackunov B. *Lake Issyk-Kul: Its Natural Environment*, Dordrecht. NATO Science Series, Kluwer. 125–145.
12. *Hofer M., Peeters F., Aeschbach-Hertig W. et al.* Rapid deep-water renewal in Lake Issyk-Kul (Kyrgyzstan) indicated by transient tracers // *Limnol. and Oceanogr.* 2002. V. 47. P. 1210–1216.
13. *Ilyasov Sh., Zabenko O., Gaydamak N. et al.* Climate profile of the Kyrgyz Republic. UNDP Report. Bishkek. 2013. 99 pp.
14. <https://knews.kg/2018/11/28/issyk-kul-ezhagodno-mozhet-prinimat-1-5-mln-turistov-no-ochistnyh-sooruzhenij-ne-hvataet/>. Дата последнего просмотра 19 августа 2019 г.
15. *Kulnabekov Zh., Merkel B.J.* Investigation of the natural uranium content in the Issyk-Kul lake, Kyrgyzstan // *Freiberg Online Geology*. 2012. V. 33. P. 3–45.
16. *Lyons W. B., Welch K.A., Bonzongo J.-C. et al.* A preliminary assessment of the geochemical dynamics of Issyk-Kul Lake, Kirghizstan // *Limnol. Oceanogr.* 2001. V. 46. P. 713–718.
17. *Mikkola H.* Implication of alien species introduction to loss of fish biodiversity and livelihoods on Issyk-Kul Lake in Kyrgyzstan // *Biodiversity Enrichment in a Diverse World*, Ed. Lameed G.A., ISBN 978-953-51-0718-7. P. 395–419.
18. *Molnar P., England P.* Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: Chicken or egg? // *Nature*. 1990. V. 346. P. 29–34. <https://doi.org/10.1038/346029a0>
19. *Narama C., Kicengge Kubota J., Shatravin V. et al.* The lake level changes in Central Asia during the last 1000 years based on historical map. // Eds. Watanabe B., Kubota J. *Reconceptualising cultural and environmental change in Central Asia: an historical perspective on the future*. Ili Project, Research Institute for Humanity and Nature. Kyoto. P. 11–27.
20. *Oberhansli H., Molnar P.* Climate evolution in Central Asia during the past few million years: A case study from Issyk-Kul // *Scientific Drilling*. 2012. V. 13. <https://doi.org/10.2204/iodp/sd.13.09.2011>
21. *Peeters F., Finger D., Hofer M. et al.* Deep-water renewal in Lake Issyk-Kul driven by differential cooling // *Limnol. and Oceanogr.* 2003. V. 48. P. 1419–1431.
22. *Romanovsky V.V.* Water level variations and water balance of Lake Issyk-Kul // Eds. Klerkx J., Imanackunov B. *Lake Issyk-Kul: its natural environment*. NATO Science Series, Kluwer Academic Publishers, Netherlands. 2002. P. 45–58.
23. *Romanovsky V.V., Tashbaeva S., Creteaux J.-F. et al.* The closed lake Issyk-Kul as an indicator of global warming in Tien-Shan. // *Natural Science*, 2013. V. 5. P. 608–623. <https://doi.org/10.4236/ns.2013.55076>
24. *Tuzhilkin V.* Some features of the Black Sea seasonal thermohaline variability: Modern view // *Geography, Environment, Sustainability*. 2010. V. 3(2). P. 42–50. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2010-3-2-42-50>
25. *Xu X., Kleidon A., Miller L. et al.* Late Quaternary glaciation in the Tianshan and implications for palaeoclimatic change: A review. // *Boreas*. V.39. P. 215–232. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2009.00118.x>
26. *Zavialov P.O.* *Physical Oceanography of the Dying Aral Sea*. Springer-Verlag, Praxis, Chichester, UK. 2005. 154 pp.
27. *Zavialov P.O., Izhitskiy A.S., Kirillin G.B. et al.* New profiling and mooring records help to assess variability of Lake Issyk-Kul and reveal unknown features of its thermohaline structure // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2018. P. 6279–6295. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6279-2018>

Features of Thermohaline Structure and Circulation in Lake Issyk-Kul

P. O. Zavialov^{a, #}, A. S. Izhitskiy^a, G. B. Kirillin^b, V. Yu. Rezvov^c, S. A. Alymkulov^d,
K. M. Zhumaliev^d, A. K. Kurbaniyazov^{e, f}

^a*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Institute of Water Ecology and Inland Fisheries, Berlin, Germany*

^c*Moscow Physical Technical Institute, Dolgoprudny, Russia*

^d*International University of Innovation Technologies, Bishkek, Kyrgyzstan*

^e*Yassavi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan*

^f*Yessenov Caspian University of Technologies and Engineering, Aktau, Kazakhstan*

[#]*e-mail: peter@ocean.ru*

Field measurements carried out over 4 years made it possible to establish previously unknown features of thermohaline fields and circulation of Lake Issyk-Kul. The most detailed salinity distribution maps for the entire history of observations were constructed. An area of slightly increased salinity was found in the central part

of the lake, the specific “dipole” shape of which indicates the existence of not only a general cyclonic circulation, but also two separate gyres of a smaller, sub-basin scale (which is partially confirmed by direct measurements of the current velocity). It has been established that, generally speaking, salinity fields in Issyk-Kul are extraordinarily conservative – its interannual and seasonal changes, as well as spatial variability throughout the lake (with the exception of estuarine regions), are usually measured only in hundredths of g kg^{-1} . An important result of the project is the discovery of a subsurface maximum of salinity persisting from year to year at depths from 70 to 130 m. As shown on the basis of balance estimates and then confirmed by analysis of direct measurements of current velocities, the autumn-winter differential cooling leads to the fact that in canyons (i.e., the ancient river channels) in the eastern littoral region, a significant amount (up to 1 km^3) of cold coastal waters freshened by river runoff enters the bottom layers of the central part of the lake. These waters are then mixed with the more saline waters lying above, which, in a situation where the upper layer of the lake is also desalinated by river runoff, leads to the appearance of a salinity maximum at intermediate depths. Our measurements do not confirm the manifestations of global warming in the form of an inter-decadal temperature increase in the deeper layers of Lake Issyk-Kul, which was previously reported: the current (in 2018) temperature at a depth of 500 m exactly coincided with that noted in the 2003 measurements, namely about 4.44°C . However, one can point to a very weak (about 0.03 g kg^{-1}) increase in the salinity of the bottom layer over the past 40 years.

Keywords: Lake Issyk-Kul, thermohaline structure, circulation, autumn and winter cooling