

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ ИМ. В.Б. СОЧАВЫ

На правах рукописи

Жданов Андрей Александрович

**ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС И МАКРОТУРБУЛЕНТНЫЙ
ОБМЕН В ОЗЕРЕ БАЙКАЛ**

Специальность 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия



АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Иркутск - 2006

**Работа выполнена в Лимнологическом институте Сибирского отделения
Российской академии наук**

Научный руководитель

кандидат географических наук
Гранин Николай Григорьевич

Официальные оппоненты:

доктор географических наук
Игнатов Анатолий Васильевич
кандидат географических наук
Фиалков Владимир Абрамович

Ведущая организация:

Институт водных проблем
Севера КИЦ РАН,
г. Петрозаводск

Защита состоится 21 декабря в 15 ч на заседании диссертационного совета
Д 003.010.01 при Институте географии им. В.Б. Сочавы СО РАН по адресу:
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, тел/fax. (3952) 42-27-17, e-mail:
postman@irigs.irk.ru

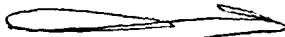
С диссертацией можно ознакомиться
в библиотеке Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим отправлять
по указанному адресу ученому секретарю совета

Автореферат разослан «17» ноября 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

кандидат географических наук



Рыков Ю.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Байкал – крупнейшее по объему пресноводное озеро мира. Редкая чистота и исключительные свойства байкальской воды определяются условиями ее формирования, а также жизнедеятельностью животного и растительного мира озера. Жизнь озера во многом зависит от динамики водных масс Байкала. Перемещение вод влияет на распределение потоков энергии в водной толще, ее термический режим, расселение донных организмов, перенос соединений биогенных элементов, фитопланктона и зоопланктона, обогащение кислородом придонных слоев воды и многие другие явления в жизни озера. Поэтому для понимания изменений, происходящих в экосистеме Байкала, необходимы четкие представления о взаимосвязи физических и биологических процессов в озере.

Изучение динамики водных масс озера приобрело четко выраженную практическую направленность в связи со строительством каскада ГЭС и интенсивным хозяйственным освоением территории водосбора озера. Это обусловлено, прежде всего, большим влиянием течений на разбавление и перенос в озере различных растворенных и взвешенных веществ. С другой стороны, научные представления об условиях формирования, характере и структуре течений, процессах адвективного и турбулентного переноса вод Байкала позволят продвинуться в направлении создания общей теории движения водных масс в крупных глубоководных водосмах.

При оценке динамики состояния качества вод Байкала важное значение приобретает прогнозирование, которое, как правило, осуществляется на основе результатов математического моделирования. Многие модели основаны на решении системы уравнений гидродинамики. Результаты решения указанных уравнений зависят от правильного задания компонент тензоров кинематического коэффициента турбулентного обмена, оценок коэффициентов турбулентной диффузии и скорости диссипации турбулентной энергии. При этом особое значение приобретает уточнение представлений о крупномасштабной турбулентности озера, ее статистических характеристиках и их пространственно-временной изменчивости.

Целью работы является исследование закономерностей формирования крупномасштабной циркуляции вод, а также горизонтального макротурбулентного обмена в Байкале, определяющих распространение химических и биологических компонентов в озере.

Для ее достижения были поставлены следующие **задачи**:

- выбрать оптимальные методы обработки данных по течениям, для чего провести критический анализ существующих аппаратуры и методов обработки натуральных данных;
- выделить основные факторы, определяющие горизонтальный обмен в пелагиали и в прибрежных зонах Байкала в разные сезоны;
- на основе полученных ранее и новых натуральных данных исследовать пространственно-временную изменчивость течений;
- определить значения основных характеристик (коэффициентов горизонтального турбулентного обмена K_L и скорости диссипации ϵ турбулентной энергии) крупномасштабной турбулентности в Байкале, исследовать их пространственно-временную изменчивость.

Использованные материалы и методы исследований. Для решения поставленных задач были использованы: 1) многолетние наблюдения за течениями оз. Байкал, полученные автором с использованием автономных цифровых измерителей температуры и течений (АЦИТТ), морской вертушки ВММ-48 и буквопечатающих вертушек БПВ-2р в 1984 - 1997 гг.; 2) данные электромагнитного измерителя течений в подледный период 1996-1997 гг., использовавшегося при совместных работах с учеными Великобритании; 3) данные, полученные акустическим Доплеровским и измерителем течений AANDERA при совместных работах с сотрудниками швейцарского института EAWAG в 1996-1997 и 2001-2003 гг.; 4) материалы по течениям, полученные к.г.н. В.И. Верболовым самописцами течений БПВ-2 и БПВ-2р в 1968 - 1977 гг.; 5) данные температурных съемок озера в 1995-2003 гг. с применением высокоточного комплексного гидрофизического зонда SBE - 25 производства CHIA; 6) метеорологические характеристики за 1961-2003 гг., полученные в пост. Ливиянка сотрудниками лаборатории; 7) данные о ветровой активности в истоке р. Ангары за 2001-2004 гг., предоставленные к.г.н. В.А. Ободиным. Всего было обработано 296 рядов наблюдений за течениями продолжительностью измерений от 0.5 до 738 суток, включающих около 300 тыс. единичных измерений.

При анализе данных использованы широко применяемые в океанологии и лимнологии методы статистической обработки результатов наблюдений. Они описаны в каждой главе отдельно, так как диссертационная работа охватывает широкий круг вопросов динамики вод оз. Байкал.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- применение высокоточного современного оборудования позволило выявить изменчивость придонных течений в разные гидрологические сезоны;
- впервые исследована пространственно-временная изменчивость коэффициентов горизонтального турбулентного обмена и скорости диссипации турбулентной энергии в озере; получены первые данные о сезонной изменчивости скорости диссипации турбулентной энергии;
- впервые проведены исследования режима подледных течений, позволившие получить первые данные о течениях в периоды установления и вскрытия ледового покрова;
- впервые установлен механизм генерации подледных течений, связанный с возбуждением геострофических течений при неравномерном прогреве вод подо льдом с разной степенью заснеженности.

Практическая значимость работы. Полученные результаты находят применение при изучении переноса тепла, химических и биологических компонентов в озере. Рассчитанные в работе характеристики течений, коэффициентов турбулентного обмена и скорости диссипации турбулентной энергии, а также характеристики их пространственно-временной изменчивости, могут применяться при разработке математических моделей динамики водных масс и процессов формирования качества воды оз. Байкал. В работе даны практические рекомендации по использованию полученных результатов. Рекомендуется для исследования крупномасштабной турбулентности оз. Байкал использовать фильтрацию осредненной скорости с периодом 12 часов.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований докладывались на: II, III и IV Всероссийских конференциях (Иркутск, 1995, 2000, 2005), III Сибирском Конгрессе по прикладной и индустриальной математике

(Новосибирск, 1998), XXVII SIL Congress (Dublin, Ireland, 1998), Joint International Symposium on Lake Baikal (Yokohama, Japan, 1998), Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанических исследований» (Москва, 1999), III International Symposium Ancient Lakes: speciation, development in time and space, natural history (Irkutsk, 2002), международном гидрофизическом рабочем совещании (Иркутск, 2002), International "BAIK-SED-2" Workshop; (Gent, Belgium, 2003), VI Всероссийском гидрофизическом съезде «Гидрофизические явления и процессы. Формирование и изменчивость речного стока, гидрологические и водохозяйственные расчеты» (С - Петербург, 2004), II международной конференции «Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов» (Иркутск, 2005) и опубликованы в сборниках трудов и тезисов, а также материалах конференций.

Публикации и личный вклад автора. По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 13 статей в рецензируемых журналах.

Работа выполнена в рамках научно-исследовательских тем ЛИН СО РАН, а также интеграционных проектов СО РАН, проектов РФФИ №04-05-64397 и №00-05-65058, грантов ИНГАС №96-1937 и №01-2309. Автор более 20 лет непосредственно участвовал в экспедиционных работах по сбору данных о динамике и термике озера, осуществлял обработку первичных данных и анализ исходных материалов, проводил расчеты коэффициентов турбулентного обмена, спектров течений. Программы для обработки данных о течениях, в частности, программы расчета течений различной обеспеченности, распределения направлений, векторного осреднения, расчета коэффициентов горизонтального турбулентного обмена написаны автором в средах MATLAB и EXCEL.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, изложенных на 127 страницах машинописного текста, иллюстрирована 35 рисунками и 12 таблицами. Список цитируемой литературы содержит 163 наименования.

Во введении обоснована актуальность работы, формулируется цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе приводится краткая характеристика климатических и гидрологических условий озера Байкал, описываются особенности его морфометрических параметров. Рассматриваются основные термические явления и процессы водообмена. Излагается краткая история исследований течений озера, начиная с работ В.М. Сокольниковой, В.И. Верболова, А.А. Айнбунда, приводится схема постоянных течений в безледный период для верхнего слоя озера (работы В.А. Кротовой, В.И. Верболова). Рассмотрены основные источники энергоснабжения течений. Анализируются современные представления о турбулентности озера Байкал, имеющиеся результаты расчетов коэффициентов горизонтального турбулентного обмена (работы В.И. Верболова, Л.М. Галкина, Л.П. Алексеева, В.А. Знаменского, С.Г. Тупинского, И.Л. Шерстянкина).

Вторая глава посвящена критическому анализу существующей аппаратуры и методов обработки натурных данных, методам выделения турбулентных пульсаций скорости течения и выбору оптимального периода сглаживания данных наблюдений для озера Байкал. Рассмотрены теоретические основы изучения турбулентности в водоемах. Приведены основные законы и зависимости, выводимые в теории локально-изотропной турбулентности (Колмогоров, 1941;

Обухов, 1941) для коэффициентов турбулентного обмена и скорости диссипации турбулентной энергии. Рассмотрены методические вопросы постановки автономных буйковых станций (АБС), методы статистической обработки полученных данных. Приводятся погрешности измерений для разных приборов.

В третьей главе рассматриваются основные факторы, определяющие режим течений в озере. Показано, что в Байкале определяющее воздействие для создания системы течений в навигационный период оказывает ветер, влияние других факторов значительно меньше или проявляется на ограниченных участках акватории. Обсуждается степень влияния на течения в подледный период таких факторов, как градиенты атмосферного давления, сейшевые колебания уровня, сток рек, плотностные неоднородности. Выявлено, что наибольший вклад в формирование течений подо льдом вносит геострофическая составляющая, обусловленная неоднородностями плотности воды.

В четвертой главе обсуждаются закономерности пространственно-временной изменчивости течений озера Байкал. Рассматриваются особенности течений в придонной зоне, на термобаре и в подледный период. Анализируются новые данные о течениях в периоды установления и вскрытия ледового покрова. Установлен механизм генерации течений подо льдом, связанный с неравномерным прогревом верхнего слоя озера из-за разной степени заснеженности льда. Проводится сравнительный анализ спектров течений верхнего слоя и придонной зоны.

Пятая глава посвящена исследованию коэффициентов горизонтального турбулентного обмена и скорости диссипации турбулентной энергии в озере Байкал. Коэффициенты турбулентного обмена рассчитывались с помощью известной формулы Эргеля, которая использует данные о пульсационных скоростях течений. Скорость диссипации турбулентной энергии оценивалась двумя методами: а) по спектрам течений; б) по анализу зависимости коэффициента турбулентного обмена от масштаба вихря.

В заключении подводятся основные итоги работы. Формулируются общие выводы и перспективы дальнейших исследований.

Автор выражает благодарность д.г.н. М.Н. Шимараеву, д.г.н. И.Б. Мизандронцеву за просмотр рукописи и обсуждение; академику РАН, д.х.н. М.А. Грачеву, к.г.н. Л.З. Гранитной за полезные замечания; Р.Ю. Гнатовскому за консультации по программированию; к.г.н. В.А. Оболкину за предоставленные метеоданные, Р.И. Ждановой за помощь в оформлении рукописи; сотрудникам лаборатории гидрологии и гидрофизики ЛИИ СО РАН, командам НИС «Титов» и «Верещагин» за помощь в проведении исследований.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ, ЯВЛЯЮЩИЕСЯ ПРЕДМЕТОМ ЗАЩИТЫ

1. Большой объем полученной информации позволил уточнить статистические характеристики и существенно детализировать картину пространственной структуры и сезонной динамики поля течений в Байкале. В период открытой воды интенсификация течений, как в верхнем, так и в придонном слое обусловлена ветровой активностью.

Пространственное распределение. Установлено, что пространственная изменчивость скоростей течения в разных котловинах имеет общие особенности. Во всех котловинах озера в результате взаимодействия течений с береговым склоном формируется достаточно сложная структура поля течений, у берега образуется своеобразный слой трения, на границе которого на расстоянии 2-3 км от берега скорости течений в верхнем слое возрастают в 1,5-2 раза по сравнению с прибрежной областью.

Такие прибрежные струи называют по-разному: например «вдольбереговые потоки» (Айнбунд, 1988) или «Coastal Jet» (Филатов, 1983), для краткости эти зоны интенсификации вдольбереговых течений мы будем называть ЗИТ. Ширина этой зоны у западного берега оз. Байкал достигает 4-5 км, у восточного – до 10 км, что обусловлено влиянием на основной поток морфометрии берега и берегового подводного склона. В этой зоне преобладает двухмодальное распределение направлений, когда повторяемость вдольбереговых течений в несколько раз превышает повторяемость течений других направлений. Эти зоны являются буферными между водами пелагиали и прибрежными водами. Здесь же происходит основное перемещение прибрежных водных масс с водами пелагиали.

В навигационный период во всех котловинах озера устанавливается устойчивая крупномасштабная циклоническая циркуляция (с масштабами до сотни км), меняющая свою интенсивность во времени, в результате чего обеспечивается преимущественный перенос вдоль западного побережья на юг и в противоположном направлении вдоль восточного побережья. Преобладание циклонической циркуляции, которое для оз. Байкал было описано многими авторами (Сокольников, 1964; Кротова, 1970; Течения, 1977; Айнбунд, 1988) характерно и для других крупных озер северного полушария (Emery, 1973; Филатов, 1983). Объясняется это тем, что при ветровых потоках, проходящих над обширной водной поверхностью, поверхностные воды под действием силы Кориолиса смещаются к правому берегу, считая по направлению ветра. В прибрежной зоне в поверхностных слоях в связи с этим возрастает турбулентность, отмечается усиление течений. Поскольку это явление имеет место при любом направлении ветра, общая циркуляция в поверхностных слоях будет циклонической (Филатов, 1983). Циклоническая циркуляция поддерживается также и тем, что при юго-западных ветрах («култуках») происходит усиление ветра у восточного берега, а при северо-восточных («верховиках») – у западного.

В некоторых местах озера макроциркуляции могут разбиваться на более мелкие (с масштабами в десятки км). Разные мнения высказываются о местах этих переходов. Наиболее обоснованной представляется схема средних течений В.И. Верболова (1996), которая приведена на схеме (рис. 1). К особенностям общей циркуляции оз. Байкал можно отнести то, что общая схема формируется постепенно в продолжение всего навигационного периода. В летние месяцы при сравнительно слабых и переменных по направлению ветрах, течения имеют большую изменчивость и невелики. Даже в районах ЗИТ превышение повторяемости основного направления над остальными невелико, в других районах основное направление или плохо выражено или существенно отличается от среднего за навигационный период. К осени в связи с увеличением скорости и повторяемости основных ветров, течения и их устойчивость заметно возрастают. Таким образом, от лета к осени происходит повышение устойчивости общей схемы преобладающих течений.

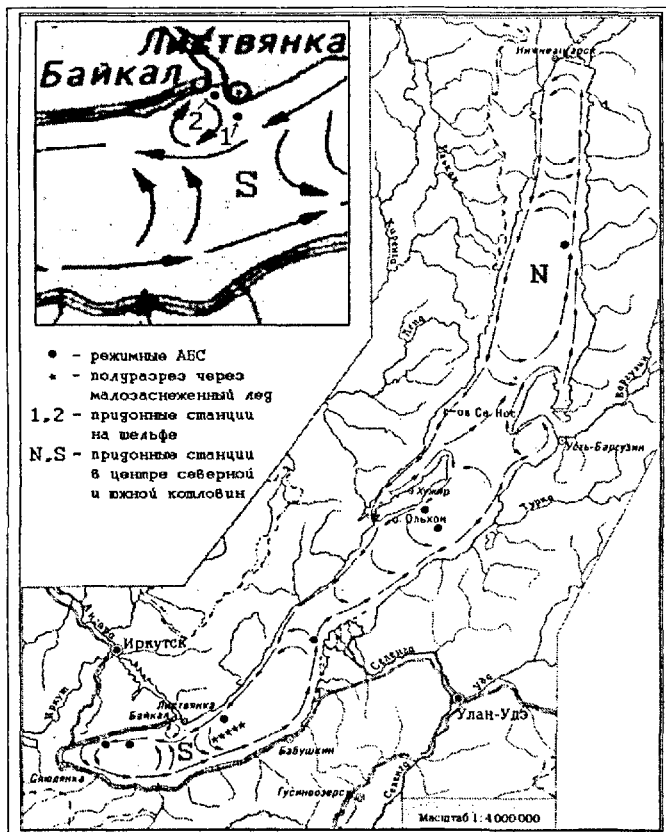


Рис. 1. Схема средних за безледный период течений верхнего слоя оз. Байкал и положение основных буйковых станций.

Вертикальное распределение. Характерное вертикальное распределение скорости течения приведено на рис. 2 для станции, где одновременно на разных горизонтах работало максимальное (14) количество приборов. Так как скорость течения - величина векторная, при усреднении ее значений наряду с математическим ожиданием или средним модулем скорости (u_v) появляется еще одна важная характеристика течений - средний модуль векторной скорости течения (u_p), характеризующая перенос водных масс за период усреднения. Анализируя данные рис. 2 можно сделать вывод о более активном движении поверхностных и придонных водных масс.



Рис. 2. Модуль скорости (U_M) и модуль векторной (U_B) скорости течения ($\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$) на ст. 7 км от м. Кадыльный в сентябре 1971 г.

Пространственные различия. Пространственные различия параметров течений в основной водной толще можно проследить по результатам одновременных измерений на 2 станциях (в 7 км от берега и в центре озера) в Среднем Байкале в области максимальных глубин осенью 1973 г.

Модуль скорости течения в верхнем слое озера в ЗИТ был больше примерно на 30%, чем в центре озера, а превышение векторной скорости (рис. 3) в верхнем слое было в несколько раз больше (до 300%) и в более глубоких слоях векторная скорость в ЗИТ также превышала таковую в центре озера.

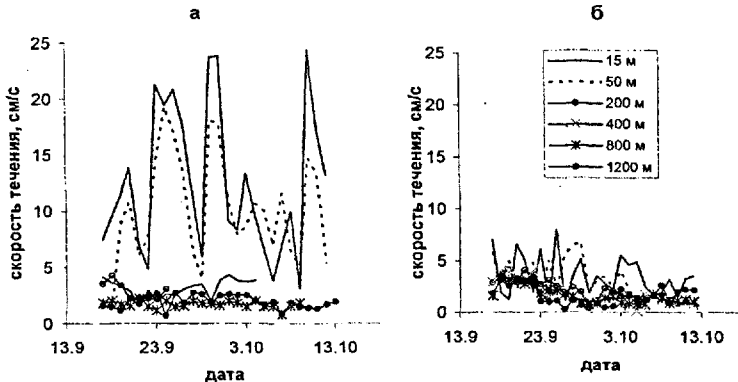


Рис. 3. Среднесуточный модуль векторной (U_B) скорости течения ($\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$) в сентябре-октябре 1973 г.: а – 7 км от м. Ухан, б – 21 км от м. Ухан.

Это показывает, что в ЗИТ перенос водных масс происходит в несколько раз быстрее, чем в остальных частях озера, и при попадании загрязнений в зону ЗИТ, скорость распространения примесей тоже увеличится в несколько раз.

В характере изменений векторной скорости в ЗИТ (рис. 3 а) прослеживаются крупномасштабные колебания с периодом в несколько суток, которые связаны с крупномасштабной (синоптической) изменчивостью ветра.

Из распределения повторяемости направлений по румбам видно, что у западного берега в ЗИТ на всех горизонтах преобладают течения западного и северо-западного направления (рис. 4 а), что характеризует циклоническую циркуляцию.

В центре озера (рис. 4 б) распределение направлений показывает, что устойчивость течений невелика на всех горизонтах. Она несколько возрастает в средине водного тела (200-800 м), где течения направлены на юг.

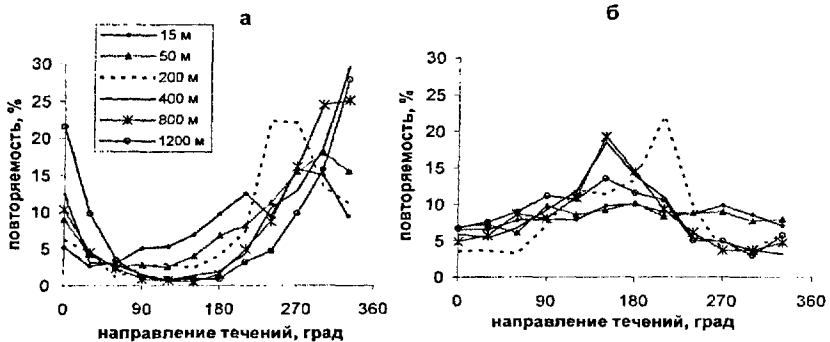


Рис. 4. Повторяемость направлений течений (%), 17.09- 13.10.1973: а — 7 км от м. Ухай, б — 21 км от м. Ухай.

Сезонная изменчивость. Самой значимой является сезонная изменчивость течений. Это обусловлено значительными изменениями потока энергии, поступающей в водоем за счет сезонной изменчивости энергии ветра, а зимой с исчезновением этого потока из-за наличия сплошного ледового покрова.

Для всех 3 котловин озера характерно увеличение средних скоростей течений от лета к осени, что подтверждает более ранние исследования. Наблюдается увеличение не только средних скалярных скоростей, но и средних векторных. Эта тенденция для векторных скоростей в отдельные месяцы в разных районах озера может нарушаться, что говорит о том, что в некоторых случаях устойчивость потока уменьшается. Максимумы в верхнем слое скорости течения достигают в декабре при максимальной активности ветров, второй по значимости максимум течений отмечается в мае при вскрытии озера.

Спектры течений. Течения в озере Байкал нестационарны. Их спектры подобны спектрам океанических течений. Существуют зоны энергоснабжения в области инерционных частот (≈ 15 часов) и синоптических колебаний (4-8 суток), а также на частоте одноузловой сейши (4.6 часа). Очень часто наблюдаются максимумы на частоте первого обертона инерционной частоты (≈ 7 часов). Такие

колебания наблюдаются как на спектрах верхнего слоя, так и в придонной зоне, разница состоит лишь в величине спектральной плотности мощности, в придонной зоне она ниже примерно на порядок.

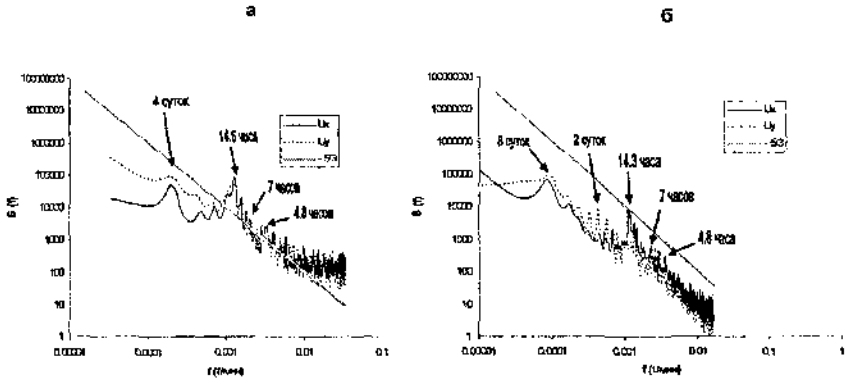


Рис. 5. Спектры течений $S(f)$, ($\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{мин}$) на ст.6 км от м. Половинный в августе-октябре 1986 г. в верхнем (гор. 15 м) слое (а) и придонных течений (гор.1380 м) в южной котловине озера в августе – декабре 2001 г. (б).

Придонные течения. Данные о течениях в придонной зоне получены в ходе совместных работ со швейцарским институтом EAWAG. В течение двух лет 2001-2003 гг. течения регистрировались на 2 станциях в центре южной и северной котловин. Северная станция (N) была расположена в центре циклонической циркуляционной ячейки, а южная (S) - на ее периферии (рис. 1).

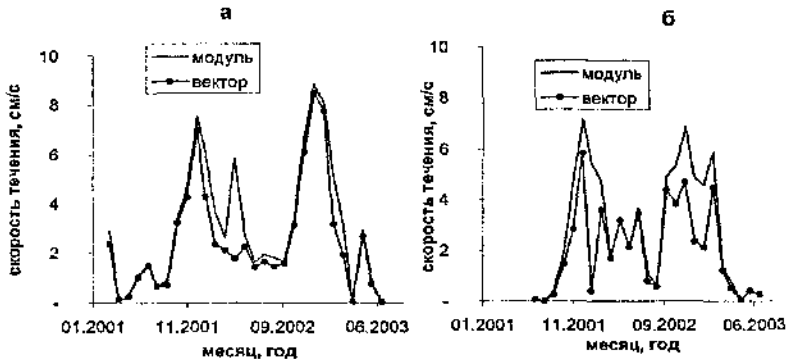


Рис. 6. Среднемесячная скорость придонных течений ($\text{см} \cdot \text{с}^{-1}$) в 2001-2003 гг.: а – южная котловина, б-северная котловина.

Сезонный ход придонных течений сходен в обеих котловинах. В южной котловине скорости течения в целом несколько больше, чем в северной, что

соответствует распределению энергетических потоков поступающих в озеро, т.к. интенсивность ветров в северной котловине в целом меньше. Среднемесячная скорость течения имеет главный максимум (7-8 $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$) в обеих котловинах в декабре в момент максимальной ветровой активности и более слабый максимум в мае (3-5 $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$) при вскрытии озера, минимумы наблюдаются перед вскрытием – в апреле и летом – в июле (рис. 6).

Еще более отчетливо это проявляется в распределении максимальных скоростей (рис.7). Максимальные скорости придонных течений в северной котловине перед ледоставом значительно превышают таковые в южной (55 и 25 $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$), а при вскрытии скорости достигают 30 и 10 $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$ соответственно.

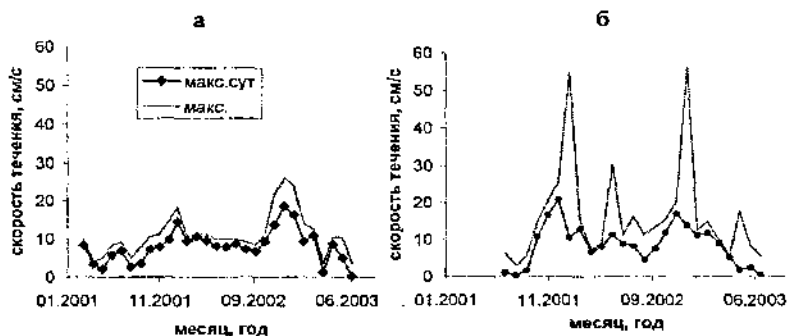


Рис. 7. Максимальные скорости ($\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$) придонных течений (макс.сут – осредненная за сутки максимальная скорость, макс. – максимальная скорость): а – южная котловина, б – северная котловина.

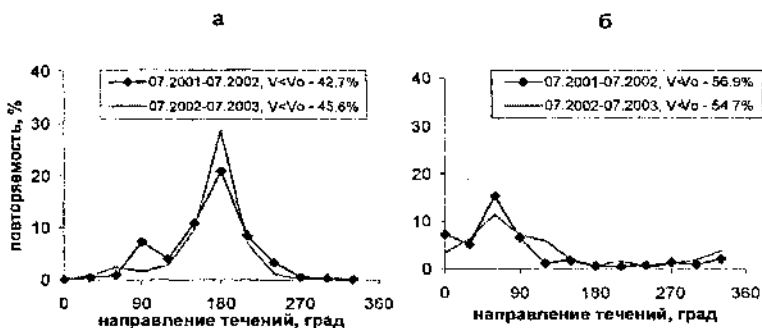


Рис. 8. Повторяемость направлений придонных течений (%) в 2001-2003 гг.: а – южная котловина, б – северная котловина.

Распределение направлений имеет преимущественно одномодальный вид (рис. 8). В южной котловине преобладают течения южного (180°) направления, в

северной - северо-восточного (60°). Повторяемость основного направления в южной котловине в 2 раза выше, чем в северной. В южной котловине 43-46% измерений были ниже порога чувствительности приборов, в северной котловине - 55-57%. Межгодовая разница в распределении направлений неаслика (< 5%)

Таким образом, установлено, что интенсификация течений в верхнем слое связана с общей гидрометеорологической ситуацией. Главный максимум скорости течений наблюдается в декабре при максимальной активности ветров. Второй по значимости максимум скорости отмечается в мае после вскрытия озера. Течения минимальны в июне и в середине ледового периода (февраль). В придонной зоне интенсификация течений также связана с общей гидрометеорологической ситуацией. Максимум скорости течений наблюдается в декабре при максимальной активности ветров. Второй по значимости максимум скорости течений наблюдается в мае при вскрытии озера. В отличие от течений на шельфе придонные течения в пелагиали зимой затухают медленнее, они значимы до конца февраля. Минимум придонных течений наблюдается в апреле, когда в верхнем слое уже начинается активизация течений из-за неравномерного прогрева верхнего слоя. Направления течений в придонной зоне в целом соответствуют направлениям течений верхнего слоя и хорошо согласуются со схемой средних течений.

2. Определены значения коэффициентов горизонтального обмена и скорости диссипации турбулентной энергии в различных областях Байкала и в различные сезоны года. Оценены их зависимости от скорости ветра, течения и пространственных масштабов вихрей. Показано, что интенсивность турбулентных процессов наиболее сильно связана со скоростью течения и масштабами вихрей.

Разделение всего многообразия движений различных масштабов на движения осредненные и турбулентные является одним из основных и наиболее сложных вопросов, возникающих при исследовании турбулентности в больших глубоких водоемах.

Этого разделения можно избежать, используя положения теории локально-изотропной турбулентности Колмогорова-Обухова. Если допустить, что гипотеза Тейлора о «замороженной» турбулентности справедлива для оз. Байкал, то от разности мгновенных скоростей в близкие моменты времени легко перейти к разности скоростей в соседних точках турбулентного потока.

Для выделения турбулентных движений использовался метод математической фильтрации данных. Было проанализировано действие нескольких фильтров и наиболее оптимальным признан косинус фильтр Тьюки.

Для выбора оптимального периода сглаживания были проанализированы спектры нульсационных скоростей течений, прошедших фильтрацию косинус-фильтром с периодами осреднения от 3 до 36 часов. Был сделан выбор, что для характеристики крупномасштабной турбулентности пелагиали оз. Байкал, предпочтительней фильтрация с периодом 12 ч. При фильтрации с таким периодом сглаживания осредненные движения в полученных рядах почти полностью подавляются, инерционные движения проявляются с небольшой амплитудой и почти без изменений проходят колебания с периодами 4-8 часов, представляющие наибольший интерес при исследовании крупномасштабной турбулентности.

Коэффициенты турбулентного обмена. Коэффициенты турбулентного обмена рассчитывались нами с помощью известной формулы Эртеля, которая использует данные о пульсационных скоростях течений.

Полученные в результате расчетов коэффициенты турбулентного обмена изменяются в широких пределах: в навигационный период до $50 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ - для прибрежной зоны и до $200 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ - для пелагической части озера. Зимой значения K_L меньше - до $1 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Для наглядного представления процессов горизонтального турбулентного обмена воспользуемся уравнением эллипса «обмена», которое характеризует экстремальные значения коэффициентов. В результате построения эллипсов обмена для различных районов Байкала была выявлена резкая анизотропия процесса обмена в прибрежных частях озера, а особенно в ЗИТ. При суточном осреднении обмен вдоль озера в прибрежной части озера может в 3-5 раз быть интенсивнее обмена в поперечном берегу направлении, а в ЗИТ этот показатель может достигать 10. С удалением от берега степень анизотропии убывает и в пелагиали озера процесс обмена можно считать практически изотропным. Граница, где экстремальные значения компонент коэффициента турбулентного обмена различаются не более, чем в 1.5 раза соответствует внешней границе области ЗИТ (8-12 км).

По вертикали анизотропия проявляется только в верхнем и придонном слоях (рис. 9).

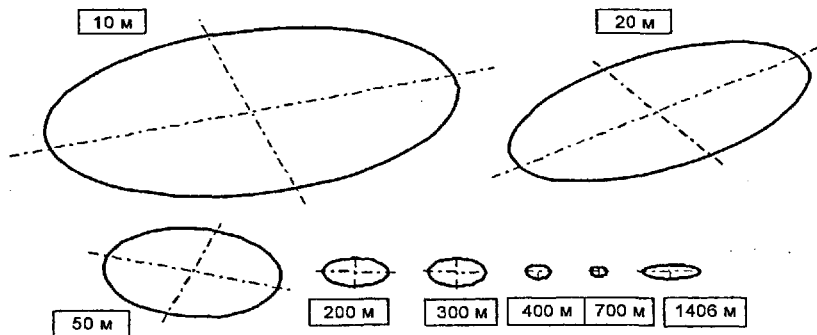


Рис. 9. Эллипсы турбулентного обмена для разных глубин на ст.7 км от м. Кадыльный в сентябре 1971 г.

Изменения коэффициентов горизонтального турбулентного обмена значительны как во времени, так и в пространстве. Изменение во времени K_L обусловлено в первую очередь изменениями средней скорости течения, которые зависят от изменений общей синоптической обстановки. Изменения скорости ветра влияют на турбулентность опосредованно через изменения средней скорости течений. При увеличении ветровой активности коэффициенты турбулентного обмена, как правило, тоже увеличиваются (рис. 10).

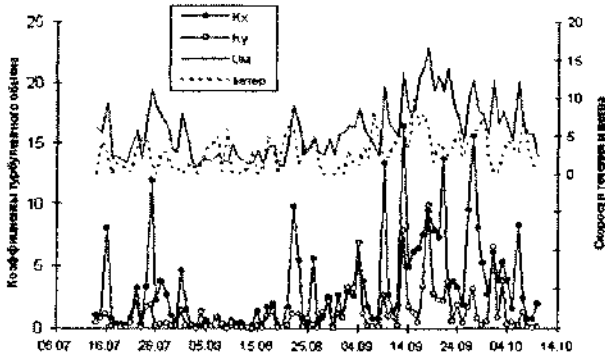


Рис. 10. Среднесуточные модули скорости течения U_m ($\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$), коэффициенты турбулентного обмена K_x, K_y ($\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}$) на ст. 7 км от м. Кадильный в 1990 г.

Но эта связь оказалась значительно слабее (коэффициенты корреляции не превышают 0.3), чем связь со средней скоростью течения ($R=0.6$). Получено аналитическое выражение этой связи для пелагиали.

$$K_x = 40 \cdot u_x^{1.3}, K_y = 46 \cdot u_y^{1.6}, \quad (1)$$

которое показывает изотропность процессов обмена. Для ЗИТ получена зависимость подтверждающая анизотропность процессов обмена в этой зоне

$$K_x = 23 \cdot u_x^{1.5}, K_y = 112 \cdot u_y^{1.7}. \quad (2)$$

Скорость диссипации. Скорость диссипации турбулентной энергии ε оценивалась двумя методами:

1. по спектрам течений;
2. по анализу зависимости коэффициента турбулентного обмена от масштаба вихря.

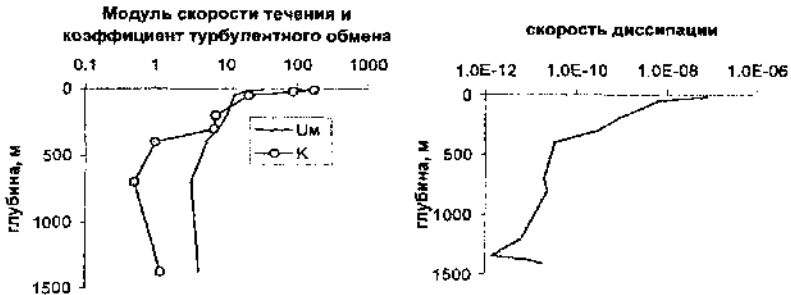


Рис. 11. Характерное вертикальное распределение среднего модуля скорости течения U_m ($\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$), коэффициента турбулентного обмена K_L ($\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}$) и скорости диссипации ε ($\text{м}^2\cdot\text{с}^{-3}$) на ст. 7 км от м. Кадильный в 1971 г.

Сопоставление данных скорости диссипации турбулентной энергии, рассчитанной двумя способами, показало хорошее соответствие этих методов расчета ε для верхнего слоя.

Анализ пространственного распределения скорости диссипации показал, что вблизи берега она возрастает, достигая максимума в зонах с устойчивыми течениями, к центру озера скорость диссипации уменьшается.

Распределение коэффициентов горизонтального турбулентного обмена по вертикали в целом соответствует распределению скорости течений (рис. 11), при этом в верхнем слое K_L может быть больше на 2 порядка, чем в средних слоях. В вертикальном распределении ε имеются максимумы в верхнем 50-метровом слое и у дна, минимум приходится на верхнюю границу придонного слоя.

Получены эмпирические зависимости коэффициентов турбулентного обмена от масштаба вихрей для навигационного и подледного периода.

В среднем для масштабов 10-1000 м при выполнении условий локальной изотропии для пелагиали по данным навигационного периода получена зависимость вида

$$K_L = 1.8 \cdot 10^{-4} l^{4/3}, \quad (3)$$

здесь K_L в $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, l - в м, среднеквадратическое отклонение $\sigma = 4\%$, коэффициент корреляции $R = 0.96$.

Для подледных течений коэффициент ε оказался меньше, а показатель степени n близок к 4/3:

$$K_L = 1.0 \cdot 10^{-4} l^{4/3}, \quad (4)$$

при этом $\sigma = 6\%$, $R = 0.94$.

В сезонной изменчивости скорости диссипации турбулентной энергии в верхнем слое в навигационный период отмечается ее возрастание от лета к осени, при этом наблюдается понижение в августе, отмеченное почти на всех рассматриваемых режимных АБС (рис. 12).

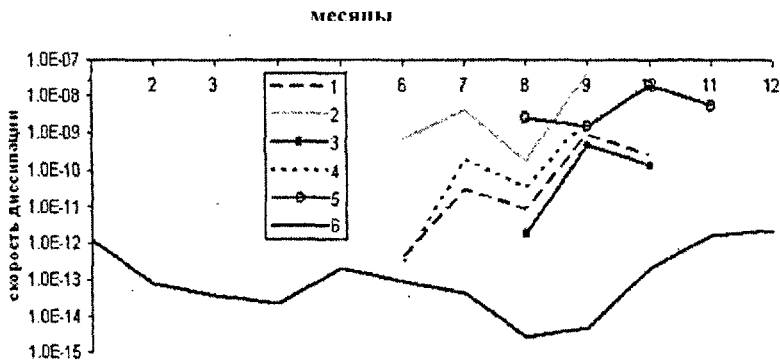


Рис. 12. Изменчивость скорости диссипации ε ($\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$) по месяцам. 1 – 7 км от м. Кадыльный, 1990 г.; 2 – 7 км от Харауза, 1970 г.; 3 – 6 км от м. Половинный, 1986 г.; 4 – 5 км от м. Кабаний, 1972 г.; 5 – 3 км от Маритуя, 1970 г.; ст. 1-5 для слоя 10-50 м, 6 – придонная (гор.1380 м) станция в южной котловине, 2002 г.

Это видимо связано с тем, что в августе по сравнению с июлем интенсивность течений снижается, что проявляется на большинстве станций. В зимний период (февраль-март) скорость диссипации в верхнем слое составляет порядка 10^{-12} - 10^{-10} $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$. В придонном слое отмечается 2 минимума ϵ (в августе и апреле) и 2 максимума (в мае и декабре), скорость диссипации находится в пределах 10^{-15} - 10^{-12} $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$. Скорость диссипации для верхнего слоя неплохо согласуется с оценками (Ravens et al., 2000; Wuest et al., 2000), которые они получили по данным микроструктурного зонда.

3. Установлен факт усиления течений в подледный период. Предложен объясняющий это явление физический механизм, основывающийся на неравномерном прогреве верхнего слоя воды вследствие наличия существенных неоднородностей в распределении снежно-ледового покрова по акватории озера.

Получена новая информация по зимним течениям. По нашим данным в верхнем слое озера зимой наблюдаются спорадические увеличения скоростей течений до $11 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ в небольших по толщине 20-30 м слоях на глубинах до 80 м. Глубже течения в основном ниже порога чувствительности приборов и лишь в придонной зоне течения сопоставимы по скорости с течениями верхней зоны.

Рассмотрены особенности режима течений в периоды замерзания и вскрытия озера, которые до наших наблюдений не изучались. Информацию об этом дают измерения 1987-1988 гг. на прибрежном шельфе (глубина 7-8 м) Лиственничного залива на 2 станциях: ст. 1 - в 0.8 км от м. Березовый; ст. 2 - в 0.3 км от берега вблизи истока р. Ангары.

В начале замерзания (рис. 13 а) скорости остаются высокими даже при наличии плавающего льда, но после установления сплошного ледяного покрова сразу снижаются до значений $< V_0$, сохраняясь такими до апреля.

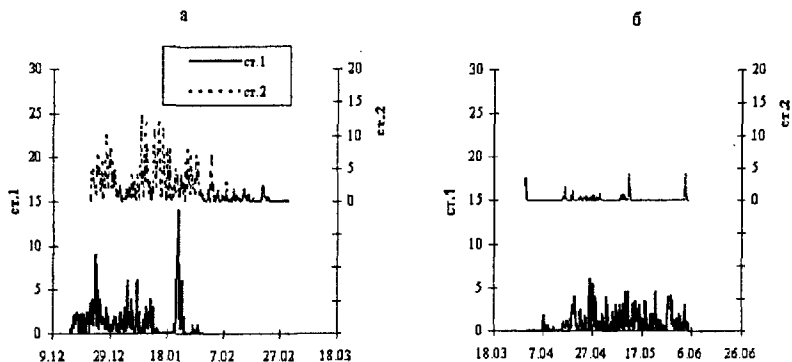


Рис. 13. Модуль скорости течения U_m (см/с) на прибрежном шельфе: а – зима 1987-88 гг., б – весна 1988 г.

Так, в 1988 году поля плавающего льда появились у берега 3 января, ледостав установился 12 января, а 20 января сильный ветер взломал лед, и трое суток сохранялась обширная полынья, что отражено в характере изменения течений на ст.1 (рис. 13 а). Быстрое их загухание у берега после ледостава указывает и на ослабление в верхних слоях открытого озера, где, средняя скорость в конце февраля по нашим данным составляет около $2 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$. На ст. 2 у истока р. Ангары скорости течения не ослабевали до конца января (рис. 13 а), что было связано с поддержанием достаточно большой полыньи ветрами из речной долины. Таким образом, открытость водной поверхности ветровым воздействиям явилась основным фактором, определяющим скорость течений вблизи берега в этот период.

Весной (рис. 13 б) в отличие от начала зимы скорости течений на мелководье внешней части залива устойчиво возрастали еще в середине апреля - за 2 недели до вскрытия озера, которое произошло 30 апреля, что свидетельствует о значительной интенсификации течений в верхних слоях открытого озера, отмеченной в начале апреля (см. табл. 1). Наиболее вероятной причиной этого может быть усиление геострофической циркуляции на границах участков с разной заснеженностью льда, что подтверждают специальные наблюдения за температурой и течениями на разрезе, пересекающим одну из таких граничных зон в центральной части Южного Байкала в конце марта.

Заснеженность льда в южной котловине озера неодинакова, она меняется год от года. Обычно у западного побережья севернее зал. Лиственничного - м. Кадильного процент незаснеженной поверхности выше из-за действия северо-западных ветров. Граница льда с разной заснеженностью по спутниковым данным (Гранин... Жданов и др., 1999; Могилев и др., 1999) довольно часто проходит по дуге от района м. Березового в северо-восточном направлении к Бабушкину. В зоне этой границы можно ожидать интенсификации течений из-за различий в термических процессах в подледном слое, что и показали наблюдения на продольном разрезе (рис.1) в центре южной котловины в 1996 г. (расстояние указано от северо-восточной станции разреза, расположенной на малозаснеженном льду).

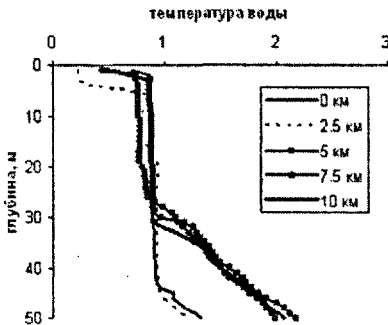


Рис. 14. Температура воды °C, 26.03.1996 г.

На станциях 0 и 2.5 км от начала разреза с малой заснеженностью льда более активная температурная конвекция (рис. 14) вызвала и более низкое положение слоя скачка температуры. Поэтому температура на глубине более 30 м и средняя по вертикали была ниже, чем на других станциях. Граница вод с разной температурой проходила между станциями в 2,5 и 5 км от начала разреза, и здесь (в 2.5 км) были зарегистрированы самые сильные (U_{max}) течения до $8.5 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$. Также на этой станции была отмечена более низкая толщина льда, которая была на 10-15 см меньше, чем на других станциях разреза (табл.1).

По данным о температуре на станциях в 2.5 и 5 км от начала разреза проведен расчет течений динамическим методом. Полученные значения скорости геострофической составляющей практически совпали с измеренными скоростями течений на станции в 2.5 км и составили $7.5 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ в верхнем слое.

Таблица. 1

Средние характеристики течений и температуры в слое 0-40 м 26 марта 1996 г на разрезе в центре южной котловины озера (расстояние указано от северо-восточной станции разреза)

Расстояние, км	Скорость течения ($\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$)			ϕ , град	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Заснеженность, %	Толщина льда, см
	U_{max}	U_m	U_v				
0					0.880	15	75
2.5	8.5	6.7	4.2	271	0.829	20	65
5	4.3	3.0	1.1	347	0.938	25	75
7.5	4.0	2.3	1.6	202	0.999	40	77
10	3.5	2.6	0.8	129	0.962	50	80

Таким образом, установлено, что в конце марта и апреле из-за увеличения притока солнечной энергии и усиления контрастов в температуре подледного слоя вклад геострофической составляющей в течения верхних слоев озера возрастает. Это приводит к активизации подледных течений, проявляющейся сначала в открытом озере, а позднее – с середины апреля – и на прибрежном шельфе.

В зависимости от степени заснеженности льда эффект весеннего усиления течений в разные годы неодинаков. Так, по материалам спутниковых наблюдений (Могилев, 1999) в 1996 году мало-заснеженные участки занимали в Южном Байкале около 40%, а в 1997 – всего 10-15% его площади. В 4,5 км южнее зал. Лиственничный средняя скорость течений в конце марта - начале апреля 1996 г. при малой заснеженности льда составила около $5 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$, тогда как при большой в 1997 г. - всего $1 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$.

Весеннее усиление подледных течений, безусловно, должно иметь место и в Среднем Байкале, отличающемся от Южного пониженным количеством летних и зимних атмосферных осадков и их значительным перераспределением преобладающими северо-зональными ветрами. В то же время в Северном Байкале, поверхность которого, как правило, равномерно покрыта снегом, эффект весенней интенсификации течений менее вероятен. Различия в режиме подледных течений в разные годы и на участках озера с разными метеорологическими характеристиками зимы создают неодинаковые условия и в режиме динамического перемешивания вод подледного слоя. Следовательно, могут различаться и условия существования

и развития гидробионтов, связанные весной не только с проникновением в воду солнечного тепла, но и с обеспечением трофогенного слоя биогенными элементами из глубинных слоев в процессе вертикального перемешивания.

Основные особенности изменения интенсивности течений в продолжение ледового периода заключаются в следующем. По результатам длительных наблюдений в верхнем и придонном (Ravens et al., 2000) слоях озера, очевидно, что режим течений с небольшими (около $0.5 - 0.9 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$) средними скоростями устанавливается к концу февраля – началу марта. Это указывает на диссипацию энергии ветровых течений во всей водной толще озера примерно за 1.5- 2 месяца после ледостава, что подтверждает оценки (Ravens, et al., 2000) и результаты экспериментов на математической модели Е.А. Цветовой (Цветова, 1974). На следующем отрезке времени – с марта до вскрытия озера – атмосферные воздействия поддерживают относительно слабые течения в придонных и глубинных слоях с редкими случаями возрастания скорости течения до $4 - 6 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$. В то же время в верхних слоях воды течения с конца марта заметно усиливаются под влиянием геострофической циркуляции, возникающей из-за различий подледного прогрева на участках озера с разной заснеженностью ледяного покрова.

Заключение.

Во всех котловинах в присклоновой зоне озера происходит интенсификация течений. У западного берега это происходит в 3-7 км от берега, у восточного в 3-12 км. В таких зонах обычно увеличивается устойчивость течений, а направление течений соответствует направлению циклонической крупномасштабной циркуляции. В центре озера течения неустойчивы. Исключением являются районы, где замыкаются крупномасштабные циркуляции и существуют потоки, перескакающие озеро в поперечном направлении.

Формирование системы течений оз. Байкал определяется рядом факторов, основным из которых в навигационный период является ветер, создающий во всех котловинах озера устойчивые циклонические циркуляции, действие которых усиливается от лета к осени. Максимумы скорости течения достигают в декабре при наибольшей интенсивности ветра. Второе по значимости усиление течений происходит в мае при вскрытии озера. Такое распределение скорости течения характерно как для верхнего слоя водной толщи, так и для придонной зоны.

После установления ледового покрова постепенно происходит затухание осенней циркуляции. К концу февраля скорости течения становятся минимальны в верхнем слое, в придонном слое течения достигают минимума позже - к апрелю.

Ранней весной (конец марта-апрель) задолго до вскрытия озера в верхнем слое начинается генерация геострофических течений за счет неравномерного прогрева вод подо льдом с разной степенью заснеженности.

После вскрытия озера (май) начинают генерироваться ветровые дрейфовые течения, которые в отдельных местах усиливаются за счет геострофических течений, обусловленных развитием термобара.

В июне-августе течения становятся слабыми вследствие уменьшения роли ветрового воздействия. Иногда в июле горизонтальные неоднородности плотности воды бывают значительны, что приводит к кратковременному усилению течений. В течение осени (сентябрь-декабрь) течения постепенно усиливаются в основном за счет увеличения скорости ветра над акваторией.

Спектральный анализ скорости течений позволил выявить максимумы в крупно- и мезомасштабной области спектра на частотах синогитических (с периодами 4-8 суток), инерционных (15 и 7 часов) и сейсмических движений (4.6 и 2.5 часа), которые проявляются как в верхнем слое, так и в придонной зоне.

Турбулентный обмен в прибрежных районах анизотропен. С удалением от берега степень анизотропии убывает, и в центральной части озера процесс обмена можно считать практически изотропным.

В верхнем слое скорость диссипации турбулентной энергии возрастает вблизи берега и уменьшается к центру озера. Скорость диссипации турбулентной энергии повышена в верхнем и придонном слоях. Минимальные значения наблюдаются над границей придонного слоя. Сезонная изменчивость скорости диссипации турбулентной энергии в верхнем слое характеризуется ее возрастанием от лета к осени. В придонном слое отмечается два минимума скорости диссипации (в августе и апреле) и два максимума (в мае и декабре), что соответствует экстремумам скорости течений.

Основным фактором, сдерживающим изучение течений и турбулентности оз. Байкал по-прежнему является недостаток натуральных данных. Поэтому одной из актуальных задач является внедрение надежных и достаточно простых в эксплуатации серийных автономных приборов. Наряду с совершенствованием натуральных исследований существенное значение для углубления представлений о характере и природе течений и турбулентности в оз. Байкал имеет дальнейшее развитие расчетных методов на основе математического моделирования.

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:

1. Диффузионная модель распространения примеси в водотоке / Моделирование переноса вещества и энергии в природных системах. – Новосибирск, 1984. - с. 68-77. (соавторы Сулаков А.Н., Хаустов А.П.).
2. Формирование и динамика байкальских вод / Новосибирск. – Наука, 1986. – 120 с. (соавторы Верболов В.И., Покатилова Т.Н., Шимараев М.Н., Федоров В.И.).
3. Distribution of Baikal pelagial ecosystem characteristics in spring convection / USSR Academy of Sciences, Siberian Branch. Institute of Biophysics: Preprint No 158 b. Krasnoyarsk; 1991: 54 p. (соавторы Granin N.G., Zavoruev V.V., Zinenko G.G., Levin A.L., Levin L.A., Tsekhanovsky V.V., Sherstyankin P.P., Shimaraev M.N.).
4. Оценка гидрофизического состояния деятельного слоя по материалам полигонных наблюдений на Байкале. / Водные Ресурсы, 1992. - № 5. – с. 74-86. (соавторы Верболов В.И., Гранин Н.Г., Левин Л.А., Шерстянкин П.П., Шимараев М.Н.).
5. Пространственно-временное распределение хлорофилла А в водах озера Байкал в зимний период / Гидробиол. Журнал, 1992. – 28 (1). – с. 17-24. (соавторы Заворуев В.В., Левин Л.А., Рачко Г.Я., Гранин Н.Г., Шерстянкин П.П., Шимараев М.Н.).
6. Deep ventilation of Lake Baikal waters due to spring thermal bars / Limnology and Oceanography, 1993. - 38 (5). – pp. 1068 - 1072. (соавторы Shimaraev M.N., Granin N.G.).
7. Турбулентное перемешивание вод озера Байкал в слое, непосредственно примыкающем к льду, и его роль в развитии диатомовых водорослей / ДАН, 1999. – 366 (6). – с. 835-839. (соавторы Гранин Н.Г., Джусон Д., Гнятовский Р.Ю., Левин

Л.А., Цехановский В.В., Горбунова Л.А., Мицько Н.П.).

8. Конвекция и перемешивание подо льдом озера Байкал. / Сибирский Экологический Журнал, 1999. - № 6. - с. 597-600. (соавторы Гранин Н.Г., Гнатовский Р.Ю., Горбунова Л.А., Цехановский В.В.).

9. Присклоновые процессы и распределение микроорганизмов в озере Байкал / Сибирский Экологический Журнал, 1999. - № 6. - с. 613-618. (Парфенова В.В., Шимараев М.Н., Косторнова Т.Я., Дрюккер В.В., Гнатовский Р.Ю., Цехановский В.В., Левин Л.А.).

10. О термохалинной природе фронтов на Байкале и их роли в процессах самоочищения озера / Геология и Геофизика, - 1999. - № 40 (12). - с. 1850-1852. (соавторы Шерстянкин П.П., Хохлов В.В., Гнатовский Р.Ю., Цехановский В.В.).

11. О вертикальном распределении микроорганизмов в озере Байкал в период весеннего обновления глубинных вод / Микробиология, 2000. - № 69 (3). - с. 433-440. (соавторы Парфенова В.В., Шимараев М.Н., Косторнова Т.Я., Домышева В.М., Дрюккер В.В., Гнатовский Р.Ю., Цехановский В.В., Логачева Н.Ф., Левин Л.А.).

12. О механизмах генерации подледных течений в Байкале / ДАН, 2001. - 377 (3). - с. 392-395. (соавторы Гранин Н.Г., Шимараев М.Н.).

13. Подледные течения Байкала (на основе новых экспериментальных данных) / География и Природные Ресурсы, 2002. - № 1. - с. 79-83. (соавторы Гранин Н.Г., Шимараев М.Н.).

14. О межкотловинном водообмене в Байкале / Водные ресурсы. - 2003. - т. 30. - № 6. - с. 678-681. (соавторы Шимараев М.Н., Гранин Н.Г., Домышева В.М., Голобокова Л.С., Гнатовский Р.Ю., Цехановский В.В., Блинов В.В.).

15. О соотношении между минерализацией и ^{3}H - ^{3}He возрастом в глубинных водах Байкала / ДАН, 2006, - т.408. - с. 404-407. (соавторы Шимараев М.Н., Гнатовский Р.Ю., Блинов В.В.).

16. Определение водных масс в озере Байкал методом T , S - анализа / География и природные ресурсы, 2006. - № 2. - с. 63-69. (соавторы Блинов В.В., Гранин Н.Г., Гнатовский Р.Ю., Римкус С.).

Подписано к печати 16.11.2006
Формат 60*84/16. Объем 1 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 364.
Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН
664033 г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1

