

На правах рукописи

**ИВАНОВ Вячеслав Геннадьевич**

**Формирование и эволюция весеннего термобара  
за счет стока реки (на примере Селенгинского мел-  
ководья озера Байкал)**

Специальность 25.00.27 - Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Иркутск - 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Лимнологический институт Сибирского отделения РАН (ЛИН СО РАН).

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук  
Шерстянкин Павел Павлович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
Чубаренко Ирина Петровна

доктор географических наук,  
профессор  
Науменко Михаил Арсеньевич

Ведущая организация:

Федеральное государственное  
бюджетное учреждение  
«Государственный гидрологический  
институт»

Защита состоится «13 декабря» 2012 г. в \_\_ час на заседании диссертационного совета Д.212.197.02 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: **195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, 98.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу: **195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, 98.**

Автореферат разослан «\_\_\_\_» ноября 2012 г.

Заслуженный работник высшей школы РФ,  
Ученый секретарь диссертационного совета  
Д.212.197.02 кандидат географических наук,  
профессор



В.Н. Воробьев

### Общая характеристика работы.

Диссертация посвящена изучению особенностей распространения речных и смешанных с озерными вод, трансформирования их термохалинных структур в период развития весеннего термического бара (термобара), на Селенгинском мелководье с учетом водного и теплового стоков в зависимости от рельефа дна.

«Термический бар» - это явление, возникающее в прибрежной части озер при переходе температуры воды через температуру ее максимальной плотности ( $T_{\text{мн}}$ ). Впервые это явление открыл и предложил термин исследователь швейцарских озер Франсуа Форель (1880). В России термобары начали изучаться с 1959 г. А.И. Тихомировым (1959), М.А. Науменко (1982) на Ладожском озере; П.П. Шерстянкиным на озере Байкал (1964), М.Н. Шимараевым, Н.Г. Граниным, А.А. Ждановым (Shimaraev, Granin, Zhdanov, 1993).

Весенний термобар на Селенгинском мелководье формируется под действием трех основных факторов: водного стока р. Селенга, теплового стока с превышением температуры речных вод над озерными и рельефа дна Селенгинского мелководья с авандельтой полностью заполняемой речной водой за время весеннего термобара.

Подробно изучено изменение термохалинных характеристик распространяющихся смешанных с озерными речных вод на всех стадиях развития весеннего термобара на Селенгинском мелководье. Показано, что термобар как гидрофизическое явление разделяет прибрежные воды на две зоны с разными характеристиками воды и определяет пространственные различия биотопа.

**Актуальность работы.** В период существования весеннего термобара на Селенгинском мелководье выделяется полоса прибрежных вод, которые, в отличие от вод открытого Байкала, имеют более высокую температуру, большие концентрации биогенных веществ, пониженную прозрачность. В этом районе наблюдаются высокие уловы омуля и других видов рыб, что имеет важное научное и народно-хозяйственное значение. По ряду особенностей протекания весенний термобар на Селенгинском мелководье имеет черты, не встречающиеся на других озерах. Значительный водный и тепловой сток, распространение речных, смешанных с озерными, вод, в основном вдоль берега является уникальным природным явлением и заслуживает подробного изучения. При длительном существовании термический бар изменяет абиотические условия прибрежной экосистемы Селенгинского мелководья. Изучение изменчивости гидрофизических характеристик, развития и формирования свойств вод весеннего термического бара с учетом значительных объемов водного и теплового стоков, а также влияния рельефа дна на пространственное распространение стоковых течений делает тему диссертации актуальной.

**Целью работы** является изучение структуры, изменчивости и особенностей развития (эволюции) весеннего термобара, вызываемого стоком р. Селенга на мелководье.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи:**

- выявить доминирующие факторы, определяющие распространение на Селенгинском мелководье речных смешанных с озерными вод, на основе анализа пространственных структур термобара;

- разработать концептуальную модель заполнения Селенгинского мелководья речными и смешанными с озерными водами с учетом величины стока и рельефа дна;

- определить диапазон изменчивости гидрофизических, термохалинных характеристик и связанных с ними параметров в период весеннего термобара, сравнить с термобарами на других озерах.

#### **Защищаемые научные положения.**

1. Значительные водный и тепловой стоки р. Селенга с учетом рельефа дна создают условия для распространения речных вод, смешанных с озерными, вслед за движением фронта термобара вдоль берега и от берега и взаимодействие с циркуляционными течениями озера Байкал.

2. Концептуальная модель развития весеннего термобара, вызванного речным стоком, на основе заполнения Селенгинского мелководья речными водами с учетом рельефа дна по возрастанию глубины позволяет прогнозировать от времени возникновения термобара его состояние: удаление фронта термобара от берега, скорость продвижения от берега и глубину.

3. Три типа весеннего термобара выделено по величине речного стока и растеканию смешанных речных и озерных вод вдоль берега: незначительный речной сток без растекания вод вдоль берега (Ладожское озеро, Малое Море на Байкале и др.), значительный речной сток без растекания вод вдоль берега (проточные озера Британской Колумбии, Канада) и значительный речной сток с растеканием смешанных речных и озерных вод вдоль берега (Селенгинское мелководье на Байкале).

**Научная новизна** полученных результатов заключается в том, что впервые:

- дана характеристика весеннего термобара на Селенгинском мелководье озера Байкал с движением фронта термобара от и вдоль берега, вдольбереговая струя заполняет прибрежные области мелководья теплыми богатыми питательными веществами речными и смешанными водами и создает уникальные, благоприятные условия для существования биоты.

- разработана модель заполнения Селенгинского мелководья под влиянием речного стока с учетом водности и рельефа дна с начала до завершения весеннего термобара, позволяющая прогнозировать состояние термобара (удаление фронта от берега и глубину) от времени возникновения;

- показана эволюция весеннего термобара за счет стока реки и выделен новый тип весеннего термобара;

- описана трансформация гидрофизических характеристик речных (от устья протоки), смешанных и озерных вод, определены пределы их изменчивости;

- такое исследование проводится на базе многочисленных натурных данных.

**Практическая значимость работы.** Полученные результаты по изучению возникновения и развития весеннего термобара со значительным влиянием водного и теплового речных стоков дают значительный вклад в понимание процессов весеннего термобара и могут быть полезны в различных областях научных исследований, связанных с изучением и хозяйственным использованием участков озер, подверженных воздействию термобаров. Выводы представляют интерес при решении экологических задач и рационального природопользования района дельты Селенги. Ранние сроки весеннего термобара и прогретой воды используются рыбопромышленными организациями для оптимальных сроков вылова рыбы.

**Достоверность** результатов основывается на большом экспериментальном материале, полученном автором с использованием высокоточного оборудования, на сопоставлении их с наблюдениями других авторов.

**Апробация работы.** Результаты исследований использовались при выполнении проектов:

- РФФИ 02-05-65337 «Сезонное и пространственное изменение термической и оптической структур байкальских вод», РФФИ 02-05-65345 «Формирование физических и химических свойств вод Селенгинского мелководья...», интеграционный Проект СО РАН № 131 «Гидродинамика вод Байкала».

**Основные результаты** диссертационной работы докладывались на 13 научных мероприятиях: Third International Symposium "Ancient Lakes: Speciation, Development in time and space, natural history" (Irkutsk, Novosibirsk, 2002); Четвертой Всероссийской научной конференции «Физические проблемы экологии (Экологическая физика)» (Москва, 2004); VI Всероссийском гидрологическом съезде (Санкт-Петербург, 2004); Всероссийской научно-методической конференции «Моделирование географических систем» (Иркутск, 2004); Международной конференции «Потоки и структуры в жидкостях» (Москва, 2005); Международной конференции "Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов" (Иркутск, 2005); Четвертой Верещагинской Байкальской конференции (Иркутск, 2005); European Large Lakes Symposium «Ecosystem changes and their ecological and socioeconomic impacts» (Tartu, Estonia, 2006); Международной научно-практической конференции «Особенности хозяйственной деятельности на Байкальской природной территории» (Улан-Удэ, 2007); Международной конференции "Потоки и структуры в жидкостях" (Санкт-Петербург, 2007); XV International Symposium. Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics (Krasnoyarsk, 2008); Всероссийском симпозиуме с международным участием, посвященный памяти Н.А. Логачева в связи с 80-летием со дня рождения (Иркутск, 2010); Пятой Верещагинской Байкальской конференции (Иркутск, 2010).

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 13 печатных работ, список которых приведен в конце автореферата.

**Личный вклад автора.** Автор принимал непосредственное участие в планировании и организации 25 съемок на Селенгинском мелководье в период 2001 – 2011 гг., анализе полученных материалов, подготовке и обсуждении публикаций, отчетов.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы из 158 наименований. Работа содержит 117 страниц текста, 27 рисунков и 8 таблиц.

Автор выражает глубокую признательность и искреннюю благодарность за помощь в проведении исследований, обсуждении и анализе их результатов научному руководителю д.ф.-м.н. П.П. Шерстянкину, д.г.н. М.Н. Шимараеву, д.г.н. И.Б. Мизандронцеву, к.г.н. Н.Г. Гранину, к.г.н. В.Н. Синюковичу, к.г.н. Л.М. Сороковиковой, с.н.с. Л.Н. Куимовой.

Во ВВЕДЕНИИ сформулированы цели исследования, обоснована актуальность и фундаментальная важность решаемой научной задачи, кратко изложено содержание диссертации, перечислены и обоснованы полученные результаты и положения, выносимые на защиту.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ содержится обзор публикаций, посвященных исследованиям весеннего термического бара, его пространственно-временной структуры по физическим показателям, как правило, температуре, проводимых путем натурных наблюдений, лабораторных экспериментов на лотках или в бассейнах, математического моделирования или в их различных комбинациях на различных озерах, включая озеро Байкал.

Форель Ф.А. открыл осенний термобар, так как в швейцарских озерах в глубоководных частях температуры вод всегда больше  $T_{мт}$ , но он предполагал существование весеннего термического бара в субумеренных полярных озерах и писал: «примеров этому пока еще не известно» (Форель, 1912). Эта неизвестность длилась удивительно долго - почти 80, лет пока А. И. Тихомиров (1959, 1963) не открыл весенний термический бар на Ладожском озере. На озере Байкал весной 1960 г. на Селенгинском мелководье П.П. Шерстянкин (1964) получил температурные структуры, которые со ссылкой на Ф.А. Фореля (1912) и А.И. Тихомирова (1959), были отнесены к явлению весеннего термического бара. Исследователь Великих Американских озер Г.К. Роджерс, ознакомившись со статьей А.И. Тихомирова (1963) на английском языке, провел наблюдения и опубликовал статьи о весеннем и зимнем термических барах на озере Онтарио (Rodgers, 1965, 1966) со ссылкой "The feature has been called the "thermal bar" by Tikhomirov (1963)". После этих работ исследования весеннего термического бара бурно развивались на Великих озерах: в Онтарио (Rodgers, 1968, 1971; Rodgers and Sato, 1970; Csanady, 1974; Scavia, Bennett, 1980); в озере Мичиган (Huang, 1969, 1971; Beletsky, Schwab, 2001); в Верхнем (Smith and Ragotzkie, 1971; Hubbard, Spain, 1973; Smith, 1973). Особый интерес представляли весенние термические бары в проточных озерах Британской Колумбии (Канада): Kamloops, Babine, Kootenay Lake, которые были подробно изучены (Carmack, 1979; Carmack et al., 1979; Carmack, Farmer, 1982; Carmack, Farmer, Gray, 1982). В проточных озерах в районе фронта термобара, где воды наиболее плотные, формируется интенсивное плотностное придонное течение (Carmack, 1979).

Изучение термобаров продолжало интенсивно развиваться на Ладожском и Онежском озерах: П.М. Бояринов (1981, 1984), Н.И. Пальшин, П.М. Бояринов (1985), М.А. Науменко (1989, 1992, 1994, 1998, с соавторами 1998, 2000, 2002). Науменко М.А. (1982) показал, что в области фронта термобара частота плаву-

чести минимальна. Развивались дистанционные и космические методы исследования динамики озер (Кондратьев, Филатов и др., 1987; Науменко, Каретников, 2002) и др. Интенсивные полевые исследования с применением контактных и дистанционных методов для изучения весеннего термического бара проводит коллектив Malm, J., D. Mironov, A. Terzhevik (1991, 1992, 1993, 1994).

Рассмотрены экспериментальные исследования термических баров в лабораторных бассейнах, гидрологических лотках и на математических моделях. Первые лабораторные и математические изучения термобара стали развиваться на Великих Американских озерах (Elliott, G.H. and Elliott J.A., 1969, 1970; Elliott G.H., 1971). Интенсивно развивались лабораторные исследования и математическое моделирование термических баров и в Советском Союзе и России: К.Д. Крейман (1989), S.S. Zilitenkevich, K.D. Kreiman, A.Yu. Terzhevik (1992), Н.С. Блохина и др. (2001, 2002, 2006), Д.А. Соловьев, Н.С. Блохина (2010), Д.А. Соловьев, Р.И. Нигматулин (2010). Зилитинкевич С.С., Тержевик А.Ю. (1987, 1989) вначале дали теорию без учета движений воды поперек плоскости термобара, что значительно упрощает формулы, но не совсем соответствует действительности, но затем ввели поправку на эти движения, что существенно приблизило теоретические представления к наблюдениям, (Науменко, 1990). Влияние стока на термобар изучали В.И. Букреев, Н.В. Гаврилов (2010) в наклонном лотке, что соответствовало моделированию термобара в проточном озере типа Камлупса, и результаты моделирования во многом совпали с наблюдениями Эдди Кармака (Carmack, 1979).

Ряд математических моделей применительно к озеру Байкал создают Е.А. Цветова (1997, 1999), О.Б. Бочаров, О.Ф. Васильев, Т.Э. Овчинникова (1999), в соавторстве с В.И. Квоном (1996). Цветова Е.А. (1979) дала оценку роли интенсивности стоковых течений в формировании крупномасштабной циркуляции как незначительную со средними значениями доли мм/с.

Лабораторное моделирование структуры термического бара и связанной с ним циркуляции в бассейне с наклонным дном выполнили И.П. Чубаренко, Н.Ю. Демченко (2008), И.П. Чубаренко (2010). Создаются оригинальные численные модели динамики вод на базе трехмерной гидродинамической негидростатической модели MIKE3 (Есюкова, Чубаренко, 2009). Возникновение конвективной системы течений с вертикальными осями для горизонтальных течений и горизонтальными осями для вертикальных в термических фронтах подробно описано применительно к озеру Байкал (Шерстянкин и др. 1995, Шерстянкин, 1997) и для озера Онтарио (Gbah, Murthy, 1998).

В Сибири термобар впервые наблюдался в 1902 г. на Телецком озере (Лепнева, 1937), на озере Байкал весенний термобар был впервые описан в 1964 г. Физико-химический режим и жизнь планктона Селенгинского района озера Байкал по наблюдениям 1957-1960 гг. изучались К.К. Вотинцевым, Г.И. Поповской, Г.Ф. Мазеповой (1963) при этом температура воды измерялась опрокидывающимися термометрами по стандартным горизонтам. Термобар в Малом Море озера Байкал был подробно изучен П.П. Шерстянкиным (1974) в июле 1968 г. По материалам наблюдений 1991 г. было исследовано распространение струи селенгинского термобара в Среднем Байкале (р. Болдакова) в глубинные воды

озера и прослежено продвижение фронта термобара вглубь озера (Shimaraev, Granin, Zhdanov, 1993). Верещагин Г.Ю. (1925) и В.Н. Яснитский (1926, 1927) первыми описали распространение в весенне-летний период в прибрежной полосе Селенгинского мелководья на Байкале теплых речных смешанных вод, не называя это явление термобаром. Было отмечено, что эти воды, отличающиеся по своим физико-химическим свойствам от вод открытого Байкала имеют более высокую температуру, повышенные концентрации биогенных веществ, низкую прозрачность, обильное содержание планктона, являющегося пищей для рыб. Здесь же наблюдаются постоянные «привалы» омуля и имеются богатые рыбные промыслы.

Термобар оказывает влияние не только на пространственное распределение температуры, но и на распределение микро-, фито- и зоопланктона и на их экологические функции (Moll, et al., 1980; Likhoshway, et al. 1996; Goldman, et al., 1996; Bondarenko, et al., 1996; Parfenova, et al., 2000).

Во ВТОРОЙ ГЛАВЕ описаны аппаратура и методы наблюдений и расчетов. Измерения температуры, электропроводности и давления (глубины) проводились CTD-зондами компании Sea-Bird Electronics, Inc. Для CTD измерений применялся метод вертикального зондирования с гидрологических лебедок научно-исследовательских кораблей ЛИН СО РАН или вручную фалом с лодки или со льда зимой от поверхности до дна. Данные CTD зонда (температура, удельная электропроводность и давление) записывались в ПК (путем считывания данных из памяти прибора), преобразовывались в систему: температура, сумма ионов и глубина в целочисленных метрах. Программно измеренная величина удельной электропроводности пересчитывалась в величину суммы ионов, по методике разработанной Н.Г. Граниным (1999) специально для озера Байкал. В дальнейшем сумма ионов обозначается символом  $Sc$  (Гранин, 1999; Блинов и др., 2006) и называется минерализацией. Для анализа термохалинных свойств воды по данным температуры  $T$ , минерализации  $Sc$  и глубины  $Z$  рассчитывались следующие термодинамические характеристики:  $\rho$  – плотность воды, г/см<sup>3</sup>;  $\alpha$  – коэффициент термического расширения, 1/°C;  $\beta$  – коэффициент соленостного сжатия, кг/г;  $\sigma$  – условная плотность, г/см<sup>3</sup>; вертикальные градиенты:  $\Gamma$  – адиабатический, °C/бар,  $T_z = (dT/dZ)$  – температуры, °C/м,  $Sc_z = (dSc/dZ)$  – минерализации, г/кг·м;  $\rho_{TT} = \partial^2 \rho / \partial T^2$  – двойная производная плотности воды  $\rho$  по температуре  $T$ , ответственная за уплотнение при смешении (cabbeling), г/см<sup>3</sup>;  $\rho_{TSc} = \rho_{ScT} = \partial^2 \rho / \partial T \partial Sc$  – смешанная производная плотности воды  $\rho$  по температуре  $T$  и минерализации  $Sc$ , кг/см<sup>3</sup>·°C;  $W$  – максимальная вертикальная скорость, см/с; устойчивости  $E_{ad}$  – адиабатическая для равновесных условий, всегда положительная, 1/м;  $E(T_z)$  – при  $T_z \neq 0$  и  $E(T_z, Sc_z)$  – при  $Sc_z \neq 0$ .

Условная плотность  $\sigma$  рассчитывалась по формуле Каменковича (1973)  $\sigma(T, Sc, Z) = [\rho(T, Sc, Z) - 1] \cdot 1000$ .

Уплотнение при смешении, УПС, рассчитывалось по полной формуле Т.Р. Кильматова, В.А. Кузьмина (1991)  $\Delta\rho_{УПС} = -(\rho_{TT}\Delta T^2 + 2\rho_{TS}\Delta T\Delta Sc + \rho_{ScSc}\Delta Sc^2)/8$ ,



где  $\Delta T$  и  $\Delta Sc$  – разности температуры  $T$  и минерализации  $Sc$  для одинаковых горизонтов между соседними станциями и краткой простой формуле:  $\Delta\rho_{\text{впс}} = -\rho_{\text{ТТ}}\Delta T^2 / 8$ . Максимальные вертикальные конвективные скорости  $W$  оценивались по формуле С.Г. Голицына (1980):  $W^2 \leq \alpha \cdot g \cdot \Delta T \cdot d$ , которая преобразовывалась в более удобную для расчетов формулу:  $W = 313.21\sqrt{\Delta\rho_{\text{впс}} / \rho}$ , см/с.

Устойчивости рассчитывались по формулам П.П. Шерстянкина, Л.Н. Куимовой (2009): адиабатическая  $E_{ad} = \alpha g \rho \Gamma$ ,  $g$  – ускорение свободного падения для равновесных условий при  $T_z \equiv 0$  и  $Sc_z \equiv 0$ ;  $E_{ad}$  всегда больше нуля (Бочаров, ак. Васильев, Овчинникова, 1999). Если градиенты температуры  $T_z \neq 0$  и  $Sc_z \equiv 0$ , то устойчивость  $E(T_z)$  равна:  $E(T_z) = E_{ad} - \alpha T_z$ . Если градиент минерализации  $Sc_z \neq 0$  и  $T_z \neq 0$ , то устойчивость  $E(T_z, Sc_z)$  равна:  $E(T_z, Sc_z) = E_{ad} - \alpha T_z + \beta Sc_z$ . В условиях безразличного равновесия при градиентах температуры и минерализации тождественно равных нулю,  $(T_z, Sc_z) \equiv 0$ , все устойчивости становятся равными адиабатической устойчивости  $E_{ad}$ :  $E = E(T_z) = E(T_z, Sc_z) \equiv E_{ad}$ .

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ дана гидрометеорологическая характеристика Селенгинского мелководья. Под гидрометеорологическими характеристиками имеются в виду данные о процессах, происходящих в атмосферной и водной среде Селенгинского мелководья. Основными характеристиками процессов для атмосферы рассматриваются приход на поверхность солнечной радиации и ее поглощение водой, нагрев или охлаждение поверхностных слоев воды и ветер, а для воды – речной водный и тепловой сток, распространение речных и смешанных с озерными вод в районе мелководья и в озере, течения, рельеф дна и донные отложения.

Селенгинское мелководье находится на границе Южной и Средней котловин озера Байкал между  $51.9^\circ$  и  $52.5^\circ$  северной широты и  $106.1^\circ$  и  $106.9^\circ$  восточной долготы от южной части Истокского Сора до м. Облом (рис. 1),

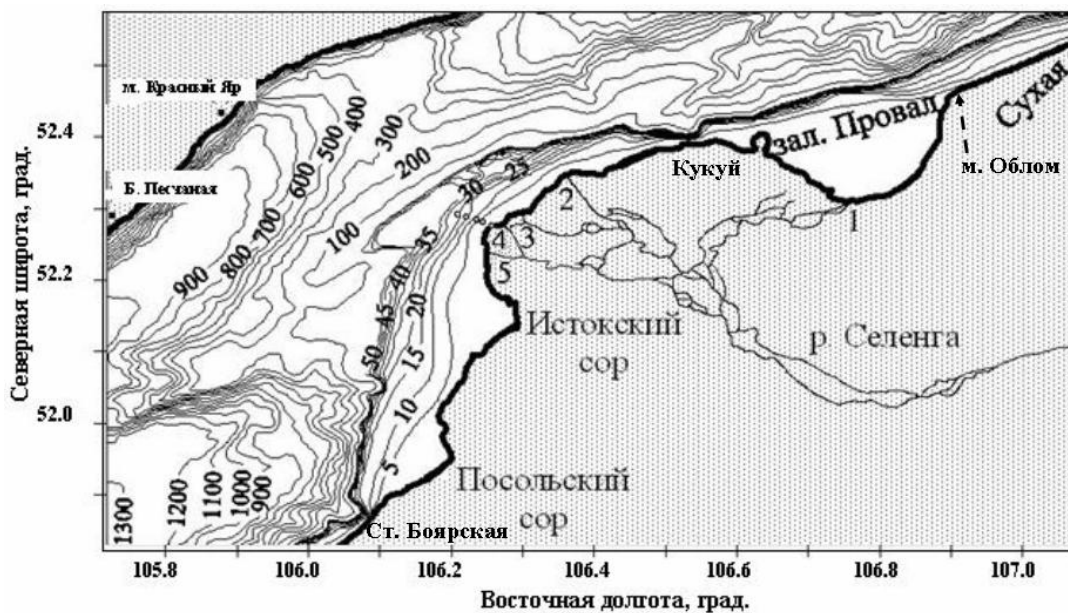


Рис. 1. Селенгинское мелководье по материалам электронных карт оз. Байкал.

расстояние между которыми составляет 70 км. Изобата 50 метров или граница авандельты против прорвы Истокского Сора находится на расстоянии 9 км, от устья протоки Харауз – 8 км, начало Кукуйского каньона примерно 1 км от берега и от м. Облом – 5 км. Площадь мелководья, если считать по авандельте, составляет порядка 500 км<sup>2</sup>. Дельта р. Селенга является одной из крупнейших внутриконтинентальных дельт мира.

Климат умеренный, резко континентальный со среднегодовой температурой воздуха 1.2 °С по данным метеостанции Исток за период 1940-1980, 1987 гг., (Лоция озера Байкал, 1993). Ледовый покров устанавливается в ноябре и разрушается в апреле-начале мая. Температура поверхностных вод в озере в течение года дважды переходит через  $T_{\text{мн}}$ . В период с начала июля по вторую половину ноября температура поверхностных вод озера выше  $T_{\text{мн}}$  (прямая температурная стратификация) и затем до начала июля ниже  $T_{\text{мн}}$  (обратная стратификация), что соответствует схеме сезонного хода температурной стратификации озер по Ф. Форелю (Forel, 1892). Прибрежные и речные воды, поступающие в озеро, в весенне-летний период прогреваются быстрее озерных. Получается, что в некоторый период в озере одновременно существуют прямая, в прибрежных районах, и обратная, в центральных частях озера, температурные стратификации. Когда фронт термобара изолирует речные воды от озерных, тогда возникает весенний термобар. Длительность весеннего термобара в среднем составляет 60 суток.

Источником поступающей в озеро механической энергии в безледный период является ветровое воздействие, которое зависит от скорости ветра. В период весеннего термобара значения скорости ветра достигают 3.5 м/с. Среднегодовые значения скорости ветра на Селенгинском мелководье для Южной и Средней котловин равны 4.0 и 4.2 м/с с максимумом в ноябре-декабре в 5.2 и 5.9 м/с и минимумом в июле – 3.2 м/с, соответственно (рис. 2а). По данным метеостанции Исток скорость ветра в сезонном ходе изменяется от 5.3-5.2 м/с в ноябре-декабре до 4.0 м/с в январе.

Солнечная радиация является основным источником поступающей в водоем энергии и зависит от высоты Солнца, которая в сезонном ходе для широты 52° с.ш. изменяется от 61.3° в июне (летнее солнцестояние) до 14.7° в декабре (зимнее солнцестояние). Для ясных безоблачных дней суммарная радиация с учетом альбедо водной поверхности или поглощенная водой, нормированная на максимальное значение, рассчитанное по формуле Х. Баумерта (1987), и измерениям В.И. Верболова и др. (1965) приведена на рис.2а. Для привязки относительных нормированных значений к абсолютным даны оценки суммарной солнечной радиации в пределах 400-700 нм с учетом альбедо для июня 444 Вт/м<sup>2</sup> по (Степанова, Шерстянкин, 1984).

Эффективность прогрева поверхностных вод в весенний период определяется максимальными значениями объемного поглощения солнечной энергии в условиях свободной конвекции (раздел 3.2).

Дельта р. Селенга находится на восточном берегу Байкала и включает в себя пять основных протоков, летние и зимние расходы которых в процентах (по-

казаны в скобках): Лобановская (37 и 10) впадает в залив Провал и, прижимаясь к правому берегу, выходит к озеру у м. Облом; Средняя (3 и 0) находится против Селенгинской перемычки; Галутай (7 и 2), Харауз или Основное русло (28 и 58) и Левобережная (25 и 30) находятся в южной части дельты. Протоки Галутай, Харауз и Левобережная дают основную долю летних и зимних расходов воды: 60 и 90%, соответственно (Синюкович и др., 2004).

Годовой сток р. Селенга составляет  $\sim 30 \text{ км}^3$  или половину всего годового притока в оз. Байкал (Вотинцев и др., 1965). В годовом ходе речной сток изменяется от  $0.28 \text{ км}^3$  в феврале и марте и до  $4-4.8 \text{ км}^3$  в мае – сентябре. Минерализация речных вод минимальна в мае – июне и в августе – сентябре с небольшим максимумом в июне – августе и основным максимумом в феврале – марте (рис. 2б). В течение года речной сток меняется более чем в 15 раз по среднемесячным значениям, а минерализация более чем в два раза.

Наибольший интерес представляет температура вод подробно изученной протоки Харауз. Для сравнения рассмотрены прибрежные температуры воды у р. Сухая, б. Песчаной и вод открытого озера, рис. 2в. Температуры вод протоки Харауз примерно на  $6^\circ\text{C}$  выше температуры вод р. Сухая и на  $6-11^\circ\text{C}$  прибрежных вод у б. Песчаная, которые только в конце мая становятся выше  $4^\circ\text{C}$ , т.е. на три-четыре недели позднее. Эти превышения температур прибрежных вод у протоки Харауз по сравнению с б. Песчаной, где влияния речных вод нет вообще, показывают влияние водного и теплового стока на температуру прибрежных вод.

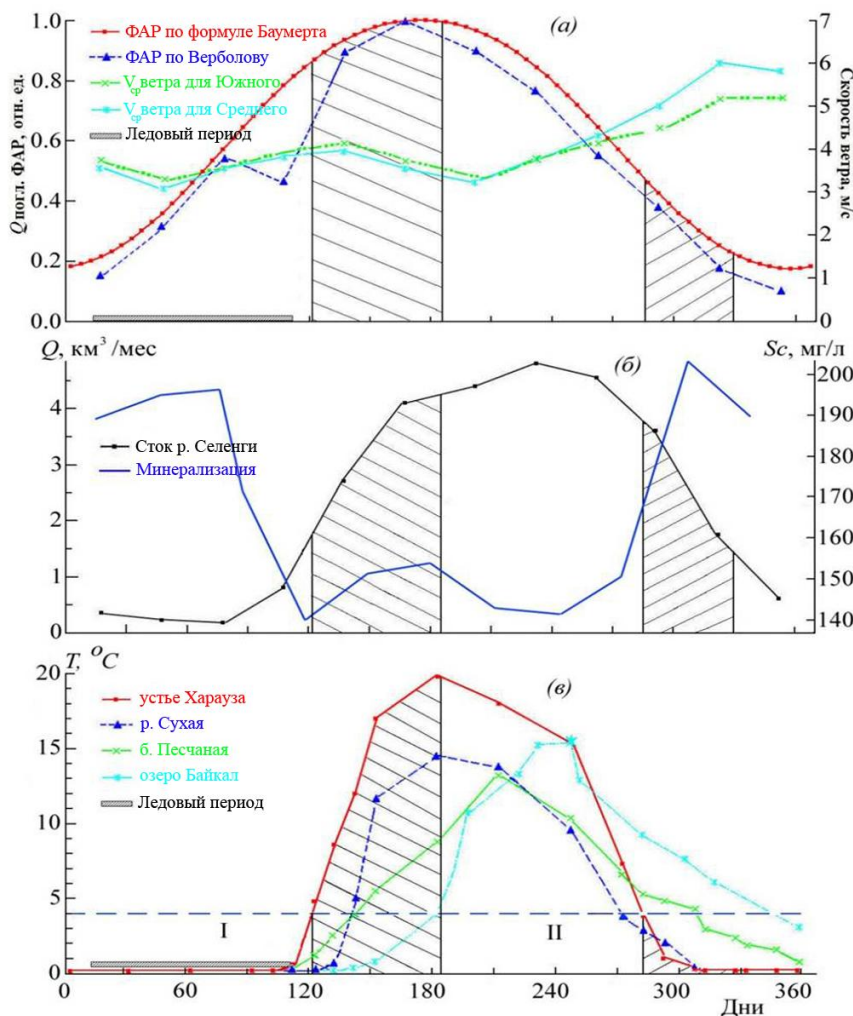


Рис. 2. Сезонный ход солнечной радиации и ветра – (а), расходов р. Селенга и минерализации речных вод – (б) и температуры речных и озерных вод – (в).

Повышение температуры вод на приустьевых участках Селенгинского мелководья в периоды весеннего и летнего прогрева было известно давно. Так Г.Ю. Верещагин (1925, 1947) и В.Н. Яснитский (1927) отмечали, что р. Селенга

вносит большие массы воды, образующие в летнее время «широкую тепловодную полосу» у устья и, по их данным, температура воды в устье р. Селенга в июне-августе на 10–12 °С выше, чем на поверхности открытого Байкала. Фактически, как отмечал М.Н. Шимараев (1977), здесь наблюдается, с учетом максимальных значений речного стока, тепловой сток р. Селенга. На долю весеннего термобара на Селенгинском мелководье, если считать, что его продолжительность длится от начала мая по первую неделю июля, придется две трети теплового стока, которая распределится исключительно в пределах авандельты р. Селенга. Такие особенности в существенном прогреве прибрежных вод Селенгинского мелководья, как абиотического фактора, должны положительно сказываться и на биоте экосистемы.

Ветровое волнение и прибрежные течения оказывают большое влияние на распространение речных смешанных вод, на режим формирования рельефа дна мелководья на глубинах до 2 м и до 20 м на донные отложения в виде песков. В более глубоких и удаленных от дельты местах большую роль в формировании рельефа дна играет тектоника (Лут, 1971). Ветровое волнение способствует крупномасштабному турбулентному перемешиванию с образованием пятен и прослоек речных смешанных вод в озерных водах на мелководье (Шерстянкин, 1964; Вотинцев и др. 1965).

Уровенный режим открытой части авандельты р. Селенга и в примыкающих к ней заливах неодинаков. Так, нагоны и сгоны в районе открытой части Селенгинского мелководья характеризуются небольшими ветровыми перекосами. По наблюдениям, в районе протоки Харауз наибольший подъем уровня в результате нагона составляет 13, средний 9 см. Сгоны вообще не обнаружены, из этого можно сделать только один вывод: сгонные явления не заметны на фоне стоковых течений, которые с мая по август максимальны (Фиалков, 1977, 1983).

Район прибрежной части Селенгинского мелководья характеризуется очень неустойчивыми ветровыми условиями, а поскольку режим течений здесь полностью зависит от режима ветра, то течения не отличаются постоянством.

Уклоны водной поверхности от протоки Харауз по измерениям В.А. Фиалкова (1977) в 1972 г. с низким положением уровня оз. Байкал были в среднем за июнь – август выше, чем в значительном по водности 1971 г. и составляли 0.11 ‰, а в октябре доходили до 0.06 ‰. В период весеннего термобара от начала мая до начала июля можно считать, что уклоны водной поверхности от протоки Харауз до удаления 1000 м имеют порядок 0.11 ‰, далее уклоны уменьшаются до самого фронта термобара, где объемы воды минимальны (т.к. температура воды близка к  $T_{м}$ ). За пределами термобара в сторону озера, температуры поверхностных вод понемногу уменьшаются, а значения уклонов начинают возрастать (Иванов и др., 2010).

В непосредственной близости от дельты р. Селенга выделяются две основные ветви прибрежных течений, особенно заметных в штилевую погоду, это северная, направленная на северо-восток, и южная, направленная на юго-запад (Верболов, 1977; Фиалков, 1983). Северная ветвь идет от протоки Средней

вдоль берега на северо-восток, перед м. Облом принимает струю стокового течения из залива Провал и далее вливается в циклоническую циркуляцию средней котловины.

Основной особенностью Селенгинского мелководья является то, что оно постоянно подвержено воздействию стока вод р. Селенга через многочисленные протоки. Для оценки средней годовой скорости стока селенгинских вод на мелководье будем считать, что выходной створ р. Селенга начинается у южной части Истокского сора, проходит по внешнему краю дельты и заканчивается у м. Облом, имеет средние глубины  $\sim 1$  м и протяженность  $\sim 70$  км (рис. 1). Тогда при среднегодовом расходе воды р. Селенга  $1000 \text{ м}^3/\text{с}$  средняя скорость стокового течения будет равна  $1.5 \text{ см}/\text{с}$ . Реальные скорости на выходе из протоков могут достигать до  $30$  и  $100 \text{ см}/\text{с}$ .

Стоковая скорость  $V_{\text{ст}}$ , существующая в течение года, создает непрерывный во времени скоростной стоковый динамический напор и соответствующее превышение уровня над уровнем озера  $\Delta H$ , которое можно рассчитать по формуле Анри Пито  $\Delta H \approx V_{\text{ст}}^2/2g$ . Значения этих превышений при скоростях в  $50$  и  $1.5 \text{ см}/\text{с}$  составят  $1.27$  и  $0.00115 \text{ см}$ , что в свою очередь, дает возможность речным и смешанным водам растекаться по направлениям, не вызывающих каких-либо препятствий к растеканию, выполняя известный принцип наименьшего действия (Иванов и др., 2010). Как быстро и какой величины создается превышение уровня от речного стока, можно рассмотреть на простом примере. Пусть средний сток летом будет  $4 \text{ км}^3$  в месяц и растекается в прибрежной полосе шириной в  $1 \text{ км}$  и длиной в  $100 \text{ км}$  ( $S=100 \text{ км}^2$ ) и не вытекает за ее пределы, тогда превышение уровня будет составлять  $40 \text{ м}$ .

Таким образом, со стороны реки создается стоковый барьер для озерных вод, препятствующий их проникновению в дельту. Исключение составляют Истокский сор и залив Провал, где сток речных вод, прижимаемых силой Кориолиса к правому берегу, вызывает заходы в заливы компенсационных течений, препятствующих застоynom явлениям и благоприятных для биоты.

Стоковый характер процессов распространения селенгинских вод на большие расстояния от дельты прослеживается в струйных течениях, для оценки которых была получена формула  $V_N(r) = V(r)/V(0) = S(0)/S(r)$ . Для протоки Харауз в направлении на м. Красный Яр для стоковой скорости  $V_N(r)$ , нормированной на скорость вытекания речной воды из устья протоки  $V_0$ , было получено экспоненциальное убывание  $V_N(r) = 51e^{-2.4r}$  (рис. 3), что соответствует теоретическим представлениям (Симонов, 1960) и совпадает с результатами измерений М.М. Айнбунда (1988). Существенно бóльшие значения стоковых скоростей получил В.А. Фиалков (1983), проводивший измерения в старом подводном русле протоки Харауз в навигационный период.

В штилевую погоду при средних расходах р. Селенга скорости стоковых течений затухают до  $\sim 1 \text{ см}/\text{с}$  на расстоянии не далее  $2.5\text{--}3 \text{ км}$ , при максимальных расходах – не далее  $6\text{--}8 \text{ км}$  (Айнбунд, 1988; Фиалков, 1983), что также согласуется с расчетами (рис. 3) (Шерстянкин, Иванов и др., 2007).

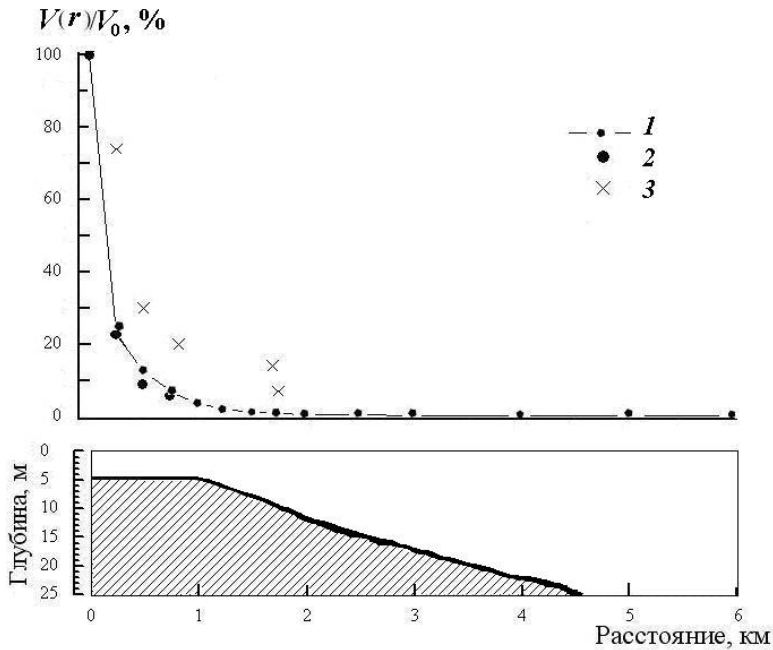


Рис. 3. Отношение скоростей стоковых течений и профиль дна мелководья от устья протоки Харауз. Условные обозначения: 1 – Рассчитано по формуле Шерстянкина, Иванова и др. (2007); по наблюдениям М.М. Айнбунда (1988) – 2 и В.А. Фиалкова (1983) в старом русле – 3.

Верещагин Г.Ю. (1925) отмечал, что воды трех главных проток р. Селенга: Голутай, Харауза и

Шаманки (сейчас Левобережная) при спокойном состоянии Байкала идут широкой струей на юг, приближаясь к западному берегу Байкала и, как показали многочисленные вертикальные серии, эти воды распространялись в июле и августе лишь на глубину 1.5–2 м. Последнее говорит о том, что в верхних слоях воды уже существовал слой скачка температуры и речные воды, смешанные с озерными водами, распространялись по слою скачка, как по жидкому грунту (Шерстянкин, 1964). Многочисленные данные показывают, что южная струя стокового течения пересекает озеро и направляется в сторону р. Ангара (Верещагин, 1925, 1947; Шерстянкин, 1964; Вотинцев и др. 1965, Галкин и др. 1970).

Весенний термобар начинается в начале мая в районе выхода в озеро основной протоки Харауз, когда в озеро поступает речная вода, прогретая до температуры выше  $T_{мн}$ , и заканчивается в конце июня - начале июля, когда повсеместно устанавливается прямая температурная стратификация при температуре воды выше  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 2б). В других местах мелководья и близких мест озера температура поверхностных вод достигает  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  позднее. Так, температура воды у р. Сухая и у б. Песчаная переходит  $T_{мн}$  на поверхности в последней декаде мая и в глубоководной части озера в начале июля, завершая существование весеннего термобара. В период весеннего термобара термические контрасты между речными и озерными водами достигают  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  и более и сохраняются на таком уровне и в период прямой стратификации. Резкие перепады температур речных и смешанных с озерными вод, достигающие  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  и более на 1 км, создают серию термических фронтов, которые становятся термобаром только при переходе через  $T_{мн}$ . В открытом океане, например, температура воды всегда больше  $T_{мн}$ , температурная стратификация всегда прямая и термобаров не может быть в принципе, за исключением окраинных морей типа Балтийского.

Продолжительности температурных стратификаций на Селенгинском мелководье выглядят таким образом: в озерной части прямая стратификация – с начала июля по конец ноября (5 месяцев), обратная – с конца ноября по начало

июля (7 месяцев); весенний термобар – с начала мая по начало июля (2 месяца) с поступлением на мелководье  $8.4 \text{ км}^3$  речной воды и осенний термобар – с начала октября по конец ноября (1.5 месяца) с поступлением на мелководье  $2.5 \text{ км}^3$  речной воды.

Дана оценка сезонному ходу вертикальных скоростей  $W$  в прибрежной полосе 1.5–4 км от устья протоки Харауз по уплотнению при смешении речных и озерных вод. По полученным оценкам (табл. 3.3 диссертации) максимальные температурные контрасты и вертикальные скорости в прибрежной полосе у протоки Харауз возникают в период весеннего термобара – 3.7 см/с, в летне-осенний период – 2.5–2.7 см/с и зимой при минимальных температурных контрастах – 0.05 см/с.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ описываются и анализируются термохалинные структуры в период весеннего термобара и летнего прогрева. С 2001 г. на Селенгинском мелководье было сделано 25 съемок с помощью прецизионных STD зондов, но обсуждаются только некоторые из них.

Термохалинная структура учитывает одновременные изменения температуры  $T$  и минерализации  $Sc$  и позволяет провести полный анализ процессов перемешивания. По известным  $T$  и  $Sc$  рассчитываются по формулам (2.1) – (2.8), приведенным в главе 2, условная плотность  $\sigma$ , вертикальная конвективная скорость  $W$ , адиабатическая равновесная устойчивость  $E_{ad}$  и устойчивости  $E(T_z)$  и  $E(T_z, Sc_z)$  при градиентах температуры  $T_z$  и минерализации  $Sc_z$ , не равных нулю. Здесь будут рассмотрены результаты расчетов по измерениям на разрезе от устья протоки Харауз в направлении на м. Красный Яр от станции в самом устье через один километр до 7 км и иногда более. Такая дискретность съемок позволила подробно изучить процессы перемешивания речных вод с озерными от начала их поступления в озеро с последующим распространением и перемешиванием. Рассмотрим эти съемки более подробно.

Сначала анализируются температура и условная плотность в районе Селенгинского мелководья по материалам съемки 29 мая – 2 июня 1960 г. На основе материалов, представленных в работе в табличной форме, мною проведена их графическая обработка рис. 4. По поведению температуры и условной плотности выявлены следующие особенности весеннего термобара на Селенгинском мелководье: фронт весеннего термобара по всему мелководью доходил до изобаты 20 м, при этом не успевал дойти до Посольского Сора на юге (температура у берега  $2.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и до м. Облом на северо-востоке ( $3.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ); скорость вдольберегового продвижения фронта от протоки Харауз на юг составляла 1.51 см/с, на северо-восток – 2.21 и от (поперек) берега – 0.2 см/с. Фронт термобара и изобаты ближе всего подходили к берегу у Кукуя, где по изотермам и изолиниям условной плотности видно формирование подповерхностной струи, единственной причиной которого является наличие Кукуйского каньона в 1 км от берега. Фронт термобара на этом полуразрезе имеет вид не вертикальной линии, а притопленной струи с удалением по поверхности и дну на 2.5, а по глубине 5 м на 4 км. В этом месте Г.Ю. Верещагин (1925) наблюдал водоворот, «пучину», что может быть вызвано затеканием речных и смешанных с озерными вод в Кукуйский каньон.

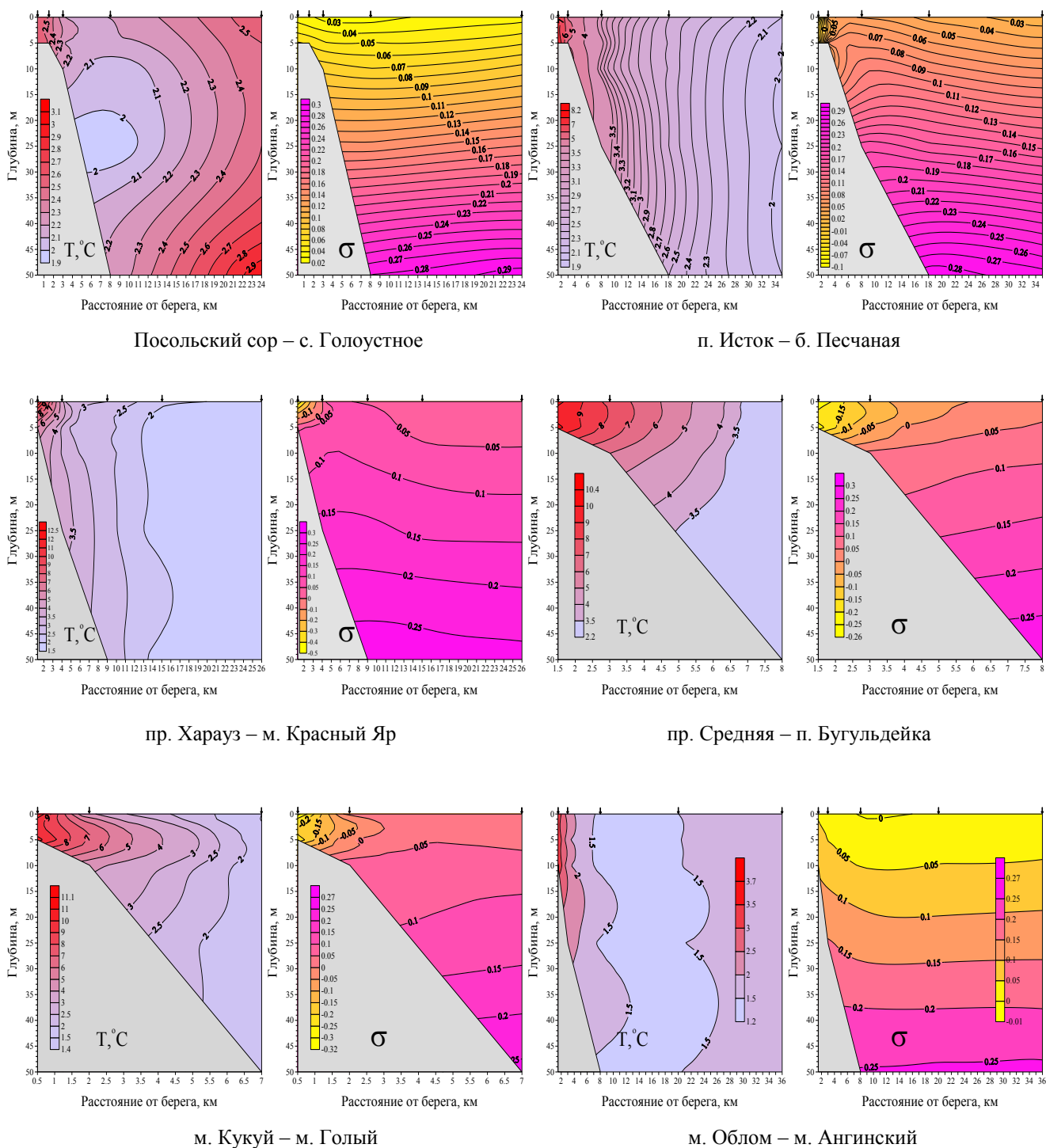


Рис. 4. Распределение температуры  $T, ^\circ C$ , и условной плотности  $\sigma, g/kg$ , на Селенгинском мелководье 28 – 30 мая 1960 г.

На Селенгинском мелководье фронт виден как четкая граница между желтоватой прибрежной и прозрачной озерной водой. Моделирование термобара в штормовую погоду показывает, что ветер, дующий от берега к термобару, разрывает линию фронта термобара, а обратный - прижимает к берегу, (Соловьев, Нигматулин, 2010; Соловьев, Блохина, 2010).

Термохалинные характеристики вод Селенгинского мелководья изучались на разрезе устье протоки Харауз – м. Красный Яр в 2003, 2004, 2007 и



2010 г., но рассматриваются наиболее характерные из них для начала за 23 мая 2010 г., окончания за 1 июля 2007 г. весеннего термобара. Съёмка 23 мая 2010 г. По средним многолетним данным прогрев вод протоки до температур выше  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , начинается в первых числах мая. По материалам снимков из космоса лёд на Селенгинском мелководье начал расходиться 21 мая (рис. 5а), а 23 мая 2010 г. (рис. 5б) весенний термобар только начал формироваться (поздняя весна и, соответственно, позднее разрушение ледового покрова).

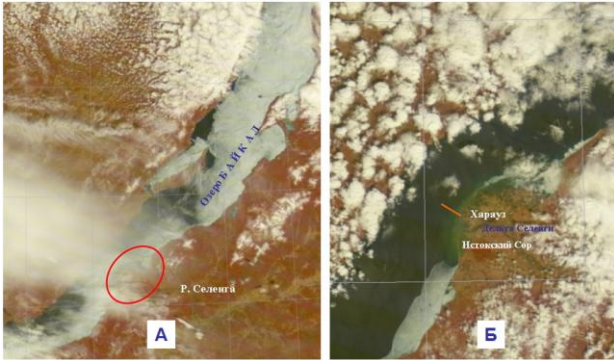


Рис. 5. Снимки Селенгинского мелководья на Байкале из космоса.

Фронт термобара проходил примерно в  $0.8\text{ км}$  от устья протоки Харауз на глубине  $5\text{ м}$ , у Посольского Сора вблизи от берега был лёд, от которого к протоке Харауз шла полоса холодной воды и просматривалась на снимке

со спутника (рис. 5а, б). На рис. 6 видно, что изолинии  $T$ ,  $S_c$  на всем протяжении разреза идут вертикально с четким разделением областей прямой (со стороны устья) и обратной (со стороны озера) температурной стратификации со следами формирования придонного слоя. По изолиниям  $\sigma$  видно, что сразу же после фронта термобара речные смешанные воды, более теплые и легкие, встречают «стену» более холодных и плотных вод, препятствующих дальнейшему проникновению речных смешанных вод в озеро. Эта «стена», с другой стороны, так же не дает возможности более холодным и плотным озерным водам проникнуть в область более теплых и менее плотных вод. Одной из основных причин возникновения такой «стены», барьера может быть стоковый (динамический) напор речных вод, поступающих в достаточном количестве.

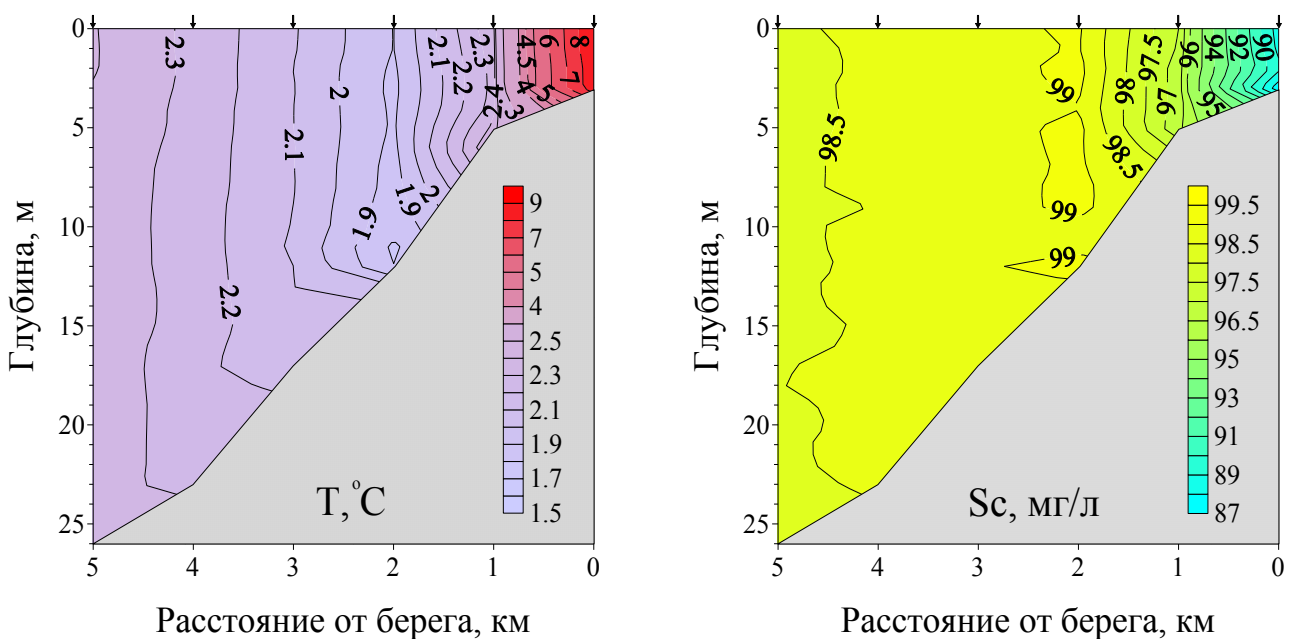


Рис. 6. Температура  $T$ , минерализация  $S_c$  23 мая 2010 г.

До фронта термобара изотермы и изохалины дают картины термических и плотностных фронтов (изолинии вертикальные). За фронтом термобара температурная стратификация становилась обратной. Начиная с устья, температура  $T$ , минерализация  $Sc$  указывали на формирование придонного течения.

Поведение исследуемых параметров воды на съемке 23 мая 2003 г. было такое же, как и 23 мая 2010 г. По данным космических снимков, съемка проводилась через две недели после полного очищения Селенгинского мелководья ото льда, т.е. термобар возник 8-10 мая 2003 г. Фронт весеннего термобара 23 мая 2003 г. находился на расстоянии 3 км с глубинами 15 м.

Термобар в конечной стадии своего развития показан на съемке 1 июля 2007 г. (рис. 7). Перед самым завершением весеннего термобара фронт проходил на середине озера в 13 км от протоки Харауз.

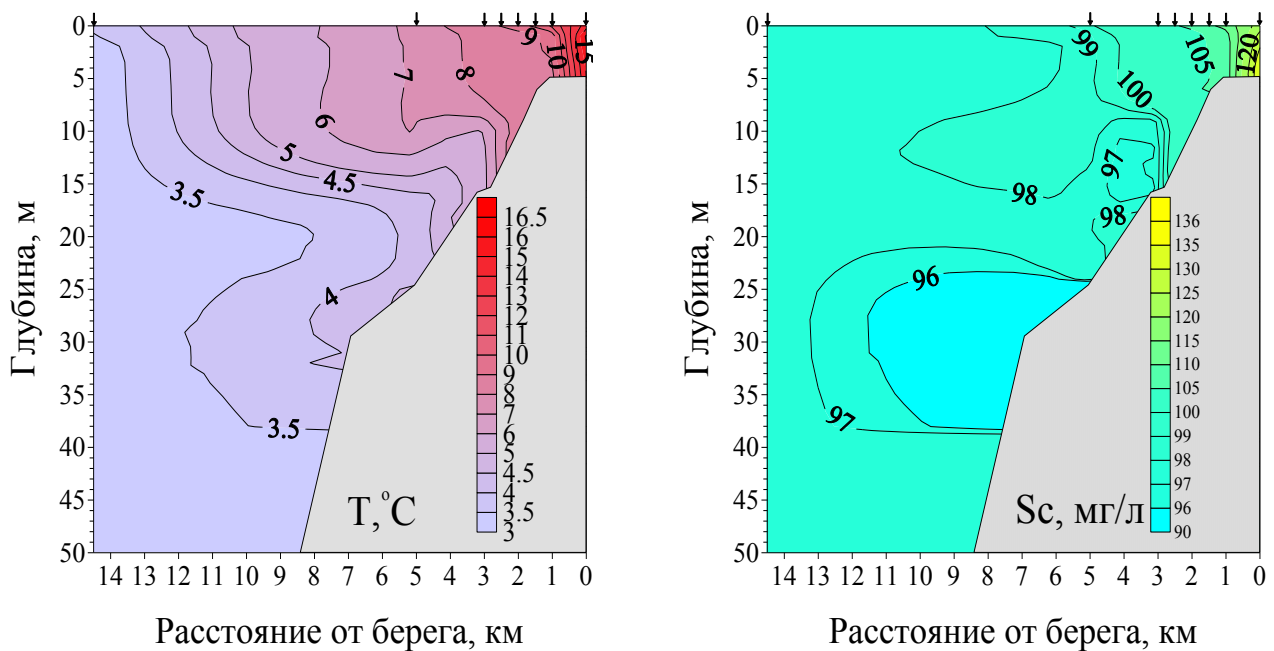


Рис. 7. Температура  $T$ , минерализация  $Sc$  1 июля 2007 г.

На участке от устья до 1 км изолинии всех характеристик были вертикальны или близки к этому. На участке 1–2 км с пятью станциями наблюдения горизонтальные градиенты всех характеристик убывали в 5 и более раз. Далее на глубинах 12–17 м возникал слой скачка температуры. Фронт термобара шел на станции 13 км от поверхности к глубине 20 м на станции 5 км, но точные характеристики отсутствуют, так как между станциями 5 и 13 км наблюдений не было. От станции 1 км к станции 14.5 км изолинии условной плотности  $\sigma$  становятся горизонтальными, т.е. за пределами термического фронта в 1 км от устья препятствий для растекания поверхностных вод к середине озера не было. В придонной области намечаются слои с повышенной температурой и минерализацией. В глубинной части разреза в 3-7 км от устья виден апвеллинг.

В ПЯТОЙ ГЛАВЕ рассматриваются характеристики весеннего термобара на Селенгинском мелководье озера Байкал.

Значительная величина стока р. Селенга в период весеннего термобара, превосходящая  $4 \text{ км}^3$  в месяц, вызвала появление ряда особенностей в его протекании на Селенгинском мелководье, не отмеченные на других озерах:

- вертикальные структуры с отсутствием слоя скачка в теплоактивной зоне термобара для термических, плотностных, вертикальных скоростей, адиабатических, равновесных устойчивостей;

- появление в начальной фазе распространения речных и смешанных озерных вод движения фронта весеннего термобара по изобатам в трех направлениях: два вдоль береговой линии на юг и на север и третье перпендикулярно берегу, от берега, как на Ладожском озере и других, что дало возможность сделать модель развития весеннего термобара с заполнением авандельты Селенгинского мелководья речными водами по нарастающим изобатам;

- дополнительное превышение уровня поверхности озерных вод в теплоактивной зоне термобара над минимальным уровнем вод в зоне фронта термобара с соответствующими вертикальными циркуляциями и усиление вдольберегового распространения вод термобара.

Температурные наблюдения на Селенгинском мелководье в мае 1960 г. и в 2003, 2004, 2007, 2010 гг. показали, что в теплоактивной зоне весеннего термобара температура, условная плотность и другие показатели имеют вертикальную структуру без слоя скачка, при этом температура; минерализация, кроме съемки 23 мая 2010 г; вертикальные конвективные скорости, все виды устойчивости вод убывали, а условная плотность и минерализация для съемки 23 мая 2010 г возрастали с удалением от устья протока (берега).

Как показала среднемноголетняя пространственная эволюция во времени весеннего термобара (изохроны) Ладожского озера фронт термобара соответствует изобатам озера, т.е. по мере развития термобара его фронт с 15 мая по 10 июля движется по изобатам по мере их возрастания (Науменко, Каретников, 2002). Эксперименты А.Г. Зацепина с соавторами (1996) показали, что во вращающейся жидкости плотностное течение в невязкой зоне направлено вдоль изобат.

Поскольку термобар начинается с прибрежных участков и перемешивание на его фронте идет от поверхности до дна, то линия фронта термобара идет последовательно по изобатам 5 – 50 м, а на глубоких прибрежных участках прижимается к берегу. Зная объемы мелководья и учитывая их последовательное увеличение с ростом глубин на участке от м. Облом до южной части Истокского сора, а также объемы поступающих речных вод, можно сделать модель заполнения речными водами авандельты р. Селенга с последовательным нарастающим заполнением ее по изобатам, рассчитать время последовательного заполнения авандельты и скорость продвижения фронта термобара от берега, (рис. 1, табл. 1).

Из табл. 1 видно, что за время существования весеннего термобара, Селенгинское мелководье за 50 дней заполнится речной и смешанной водой до изобаты 50 м и еще 10 дней термобар будет существовать после выхода за ее пределы. За первые 3-4 недели своего существования термобар доходит до изобат 25 и 30 м. Таким образом, по табл. 1 можно получить оценки удаления тер-

мобара от берега по известным направлениям от дельты. Скорости продвижения фронта термобара от берега, рассчитанные по модели заполнения авандельты речными водами по глубинам практически совпадают с наблюдаемыми, т.е. по модели, зная время зарождения, «возраста» термобара, можно определить скорость его удаления от берега и наоборот. По объему речных вод, поступающих в озеро за время существования термобара в  $8.4 \text{ км}^3$ , и по времени заполнения мелководья (табл. 1) можно определить время водообмена, которое будет равняться порядка двум месяцам.

Таблица. 1. Время последовательного заполнения речной водой при средней водности участков Селенгинского мелководья по глубинам

Параметр	Изобата, м									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Площадь, $\text{км}^2$	115.8	202.5	247.3	283.9	319.6	346.7	376.6	403.5	420.4	434.4
Объем, $\text{км}^3$	0.35	1.00	1.56	2.20	3.00	3.75	4.72	5.73	6.45	7.11
Время, сут	2.4	7.0	10.9	15.4	21.0	26.2	33.0	40.1	45.1	49.7
Расстояние от Харауза, км	1.75	2.47	3.05	3.53	4.13	4.78	6.69	8.93	9.24	9.41
Скорость, км/сут	0.73	0.35	0.28	0.23	0.197	0.182	0.203	0.223	0.205	0.189

В период весеннего термобара теплые речные смешанные воды с температурами выше  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  на некотором расстоянии от берега встречаются с холодными озерными водами, имеющими температуру меньше  $T_{\text{мн}}$ , образуя в месте встречи фронт термобара,  $T \cong T_{\text{мн}}$ , где плотность воды наибольшая. Зубов Н.Н. и К.Д. Сабинин (1958) показали, что в общем случае перемешивания двух водных масс А и В по линии фронта, соприкосновения, происходит уплотнение при смешении и понижение уровня моря, которое приводит к возникновению своеобразных вертикальных циркуляций.

*Вертикальные циркуляции с горизонтальными осями.* Реальные условия во фронтальных зонах значительно сложнее, будучи замаскированной другими факторами, однако, и понижение уровня и циркуляции, связанные с уплотнением при смешении, имеют место всегда, так как существует само явления уплотнения при смешении (Зубов, Сабинин, 1958). Такие циркуляции возникают и при термобаре, и в качестве иницирующих причин рассматриваются исключительно неравномерности прогрева наклонного дна (Зилитинкевич, Тержевик, 1987; Чубаренко, Демченко 2008; Блохина, Соловьев, 2010). В случае весеннего термобара на Селенгинском мелководье к превышению уровня со стороны устья (дельты реки) к неравномерности прогрева за счет наклонного дна дополнительно прибавляются: за счет водного, теплового стока и динамического напора.

Возникают две вертикальные циркуляционные ячейки, имеющие в зоне схождения, конвергенции общую часть – фронт термобара. По мере общего прогрева и теплового речного стока фронт термобара продвигается к центру озера.

*Горизонтальные циркуляции с вертикальными осями.* Значительный водный сток, более  $1 \text{ км}^3$  в неделю, неотделимый и от теплового стока, на пути к

центру озера особенно в начальной фазе развития весеннего термобара встречает непреодолимую «стену» холодных плотных вод, фронт термобара, и вынужден распространяться вдоль берега по глубинам и по мере заполнения возрастающих глубин получает скорость удаления фронта термобара от берега. Скорости движения фронта термобара, определенные при формировании вдольберегового фронта термобара, сохраняются в прибрежной зоне и после прохождения весеннего термобара, но значения вдоль береговых скоростей должны уменьшаться по мере уменьшения способности фронта термобара изолировать зону прямой стратификации от зоны обратной стратификации и должны полностью исчезать при исчезновении фронта термобара. Но полностью вдольбереговые прибрежные течения не исчезнут, так как они будут «перехвачены» котловинными циркуляционными течениями.

Прибрежные воды участвуют также в общей циклонической кругобайкальской циркуляции (Кротова, Маньковский, 1962; Сокольников, 1964; Верболов и др., 1965), огибающей Селенгинское мелководье и дельту р. Селенга с юга на север. В этом же месте сходятся котловинные циклонические циркуляции Южного и Среднего Байкала. Речные смешанные воды от близко расположенных проток Галутай, Харауз и Левобережная в полосе от берега до фронта термобара разбиваются на две ветви: южную и северную с преимущественным расходом у первой (Помыткин, 1962; Шерстянкин, 1964).

Речной сток значительно усиливает горизонтальные циркуляции: при его отсутствии весенний термобар на Селенгинском мелководье был бы таким же как в Ладожском озере (Тихомиров, 1959) или в Малом Море на Байкале (Шерстянкин, 1974). Тем не менее, из теоретических и экспериментальных исследований термобаров следует, что фронт термобара наряду с составляющей от (поперек) берега должен обязательно иметь и вдольбереговую составляющую даже в отсутствие речного стока (Зилитинкевич, Тержевик, 1987, 1989; Науменко, 1998; Чубаренко, Демченко, 2008).

Дополнительное превышение уровня со стороны стока привело к возникновению и усилению вдольберегового распространения речных и смешанных озерных вод в теплоактивной береговой зоне термобара. Вдольбереговые течения вызваны речным стоком и являются самостоятельными, т.е. не зависят от циркуляционных течений в озере и могут совпадать или не совпадать с ними. На самом деле северная струя стокового течения полностью совпадает с циркуляцией Среднего Байкала, а южная струя способствует повороту циркуляции Южной котловины к западному берегу.

Вдольбереговые течения, вызванные весенним термобаром, максимальны в период установления термобара, когда котловинные течения невелики (мала разность температур между прибрежными и озерными водами) и затем по мере удаления фронта термобара от берега убывают, но в это время котловинные течения растут и поддерживают вдольбереговые течения, возникшие за счет термобара.

Сочетание значительного водного и теплового стока, мелководья и больших глубин озера создают условия для распространения речных вод, смешанных с озерными, вдоль берега. Эти воды с более высокими температурами,

концентрациями питательных веществ создают в прибрежной полосе кормовую базу для рыб и других представителей биоты. О формировании особых абиотических условий в прибрежной части Селенгинского мелководья, благоприятных для биоты, было отмечено, в первую очередь, биологами: Г.Ю. Верещагиным (1925, 1947); В.Н. Яснитским (1926, 1927); К.К. Вотинцевым и др. (1963); Максименко и др. (2008).

### **Основные результаты и выводы:**

Результаты анализа многочисленных натуральных наблюдений на Селенгинском мелководье озера Байкал во время существования весеннего термобара позволяют сделать следующие выводы:

- Доминирующими факторами, определяющими распространение речных смешанных с озерными вод, на Селенгинском мелководье во время зарождения и существования весеннего термобара являются водный и тепловой сток с учетом рельефа дна, которые создают динамический напор и превышение уровня, способствующие распространению речных и смешанных с озерными вод как от берега, так и вдоль берега вслед за движением фронта термобара;

- В период развития весеннего термобара распространение речных вод, смешанных с озерными, происходит в основном вдоль берега с заполнением литоральной зоны по возрастанию глубин;

- Водный и тепловой сток в прибрежной полосе 1–3 км создают на мелководье систему термических фронтов, фронтов минерализации, вертикальных скоростей, условной плотности и устойчивости. В период летнего прогрева горизонтальные градиенты сохраняются, что подтверждает доминирующую роль речного стока;

- Модель заполнения Селенгинского мелководья под влиянием речного стока с учетом водности и рельефа дна с начала и до завершения весеннего термобара позволяет прогнозировать состояние термобара (удаление фронта от берега и глубину) от времени возникновения;

- Весенний термобар на Селенгинском мелководье озера Байкал является новым типом термобара с движением фронта термобара от и вдоль берега. На Ладожском озере, в Малом Море на Байкале вдольбереговое продвижение фронта термобара отсутствует;

- Выделяются три типа весеннего термобара, в которых характеристики областей с обратной температурной стратификацией одинаковы и различаются только характеристики областей с прямой температурной стратификацией: первый – фронт термобара движется от берега, вдольбереговые движения за счет термобара отсутствуют или незначительны, влияние речного стока незначительно; второй – фронт термобара движется от устья реки к центральной части озера, речной сток значителен и образует придонное присклоновое течение, вдольбереговые течения за счет термобара отсутствуют; третий – фронт термобара продвигается как от устья протоки в озеро, так и вдоль берега, чему способствует сочетание значительных водного и теплового стоков и рельефа дна.

## Список публикаций по теме диссертации

*Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Distribution of Pelagic Invertebrates Near a Thermal bar in Lake Baikal. // Hydrobiologia, Springer Netherlands; 2006; 568(1) P. 69-76. (соавторы Melnik N.G., Bondarenko N.A., Belykh O.I., Blinov V.V., Korovyakova (Tomberg) I.V., Kostornova T.Ya., Lazarev M.I., Logacheva N.F., Pomazkova G.I., Sherstyankin P.P., Sorokovikova L.M., Tolstikova L.I., Tereza E.P.).

2. Формирование вод Селенгинского мелководья с учетом сезонного хода речного стока, термической конвекции и термобаров. // Вод. ресурсы; 2007; 34(4); - С. 439-445. (соавторы Шерстянкин П.П., Куимова Л.Н., Синюкович В.Н.).

3. Оценка максимальных вертикальных скоростей конвекции в природных водах на примере озера Байкал // ДАН; 2007; 415(1); - С. 115-119. (соавторы Шерстянкин П.П., Куимова Л.Н.).

4. Микробное сообщество водной толщи на биогеохимическом барьере 'река Селенга-озеро Байкал' // Микробиология; 2008; (5): 660-667. (соавторы Максименко С.Ю., Земская Т.И., Павлова О.Н., Бурюхаев С.П.).

*Прочие публикации:*

1. Влияние речного стока на динамику и термику вод Селенгинского мелководья на Байкале. // Тезисы докладов VI Всероссийской конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей»; 2004; - С. 272-275. (соавторы Шерстянкин П.П., Куимова Л.Н.)

2. Моделирование весеннего термобара на Селенгинском мелководье. // Материалы Всероссийской научно-методической конференции «Моделирование географических систем»; 2004; - С.93-94. (соавторы Шерстянкин П.П., Куимова Л.Н.)

3. Изучение рельефа дна Селенгинского мелководья на озере Байкал с помощью электронных батиметрических карт. // Тезисы докладов IV Всероссийской научной конференции «Физические проблемы экологии (Экологическая физика)»; 2004; - С. 57-58. (соавторы Шерстянкин П.П., Куимова Л.Н.)

4. Сезонный ход термогидрохимических структур вод на Селенгинском мелководье. // Четвертая Верещагинская Байкальская конференция. Тезисы докладов и стендовых сообщений. 26 сентября - 1 октября, 2005 г.; 2005; - С. 221-222. (соавторы Шерстянкин П.П., Куимова Л.Н., Сороковикова Л.М., Томберг И.В.)

5. Selenga Shallow on lake Baikal : spring and autumn thermal bars. // European Large Lakes Symposium «Ecosystem changes and their ecological and socioeconomic impacts»; 2006; P. 91. (соавторы Sherstyankin P.P., Kuimova L.N.)

6. Optical and Thermal Structure of Selenga Shallow Waters on lake Baikal During Spring Thermal Bar. // XV International Symposium .Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics; 2008; P. 119. (соавторы Sherstyankin P.P., Kokhanenko G.P.)

7. Изменение химического состава вод р. Селенги на акватории Селенгинского мелководья. // Материалы международной научной конференции «Дельты Евразии: происхождение, эволюция, экология и хозяйственное освоение». г. Улан-Удэ, 16-20 августа 2010г.; 2010; - С. 98-102. (соавторы Томберг И.В., Сороковикова Л.М.)

8. К вопросу о пространственном распределении смешения речных и озерных вод Байкала. // Пятая Верещагинская Байкальская конференция, Международная научная школа для молодежи «Экология крупных водоемов и их бассейнов», 16-ый ежегодный семинар по проблемам изучения региональных осадений из атмосферы: тезисы докладов и стендовых сообщений (Иркутск 4-9 октября 2010 г.); 2010; - С. 210-212. (соавторы Блинов В.В., Синюкович В.Н.)

9. Термобары на Селенгинском мелководье озера Байкал и их роль в формировании донных отложений в прибрежной полосе. // Кайнозойский континентальный рифтогенез: Материалы Всероссийского симпозиума с международным участием, посвященного памяти Н.А. Логачева в связи с 80-летием со дня рождения / Под редакцией Е.В. Складова, С.В. Рассказова. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2010.- В 2-х томах. Т. 1. - С. 147-150. (соавторы Шерстянкин П.П., Синюкович В.Н.).

---

Подписано к печати 09.11.2012 г.  
Формат 60\*84/16. Объем 1,4 п.л. Тираж 120 экз. Заказ № 574.  
Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН.  
664033 г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1.