



УДК 551.481.11:519.6 (77.3)

Численное моделирование течений и переноса примесей в оз. Хубсугул

В. К. Аргучинцев (avk@geogr.isu.ru)

А. В. Аргучинцева (arg@math.isu.ru)

Бат-Эрдэнийн Ариунсанаа (sanaa@inbox.ru)

А. А. Макаров (mak@geogr.isu.ru)

Аннотация. В статье для оз. Хубсугул приводятся результаты моделирования течений и распространения загрязнений от рек, турбаз и при аварийных ситуациях.

Ключевые слова: моделирование, течения, примесь, реки, турбазы, оз. Хубсугул.

Введение

Озеро Хубсугул (Ховсгол, Khovsgol – монг.) расположено на севере Монголии во впадине у южных отрогов Саян на высоте 1645 м над уровнем моря. В него втекает 46 рек и вытекает единственная река Эгийн-Гол (левый приток р. Селенги). В озере при его большой глубине и скалистых берегах очень мало микроэлементов и низок обмен веществ. Поэтому самоочищение озера задерживается на века (до 500 лет) [13]. Воды озера близки по составу к байкальской и составляют 1–2 % мировых запасов пресной воды.

В 1992 г. для изучения и сохранения в естественном состоянии уникальности экосистемы озера и прилегающих к нему территорий был организован Хубсугульский национальный парк. Территория парка располагает огромным рекреационным потенциалом для развития экологического туризма в Монголии [8]. Однако следы пребывания человека (антропогенная нагрузка от расположенных вблизи водоема юрт, пастбищ, туристических баз) оказывают негативное влияние на состояние озера [12]. Экологические угрозы также возникают при авариях судов, сопровождающихся разливом нефтепродуктов.

По данным исследований, в 1996 г. прозрачность воды оз. Хубсугул составила 27 м (в самом глубоком месте озера – 262 м), через 5 лет – 20 м. В настоящее время предполагают, что прозрачность воды постепенно уменьшается [14].

Существующая сеть гидрологических наблюдений в Монголии очень редка для экспериментального изучения гидротермодинамических процессов и переноса примесей в озере. Одним из перспективных методов их изучения является математическое моделирование, которое позволяет объяс-

нять с теоретической точки зрения количественные и качественные закономерности, решать диагностические и прогностические задачи. В данной статье мы использовали негидростатическую модель с учетом сжимаемости воды, которая является более универсальной для описания процессов в стратифицированных водоемах [1].

Основные уравнения модели

В качестве основы математического моделирования процессов в глубоких водоемах примем уравнения геофизической гидродинамики, выражающие основные законы сохранения энергии, импульса и массы стратифицированных сплошных сред.

В систему дифференциальных уравнений нестационарной трехмерной нелинейной модели включаются:

уравнение движения –

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \text{grad}p - 2\vec{\omega} \times \vec{v} + \vec{g} + D\vec{v}, \quad (1)$$

уравнение неразрывности –

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \text{div} \vec{v} = 0, \quad (2)$$

уравнение притока тепла –

$$\frac{dT}{dt} - \frac{\alpha T}{c_p \rho} \frac{dp}{dt} = DT + M_m, \quad (3)$$

уравнение переноса солености –

$$\frac{dq}{dt} = Dq, \quad (4)$$

уравнение состояния, записанное в общем виде, –

$$\rho = \rho(p, T, q), \quad (5)$$

полуэмпирическое уравнение турбулентной диффузии примеси –

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \text{div}(s\vec{v}) = Ds + F, \quad (6)$$

соотношение А. М. Обухова [6; 7], часто используемое в океанологии, [3–5] –

$$k_z = \begin{cases} (0,05\eta)^2 \sqrt{G} + k_0, & \text{если } G \geq 0, \\ k_0 & \text{если } G < 0, \end{cases} \quad (7)$$

где $G = \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}$,

соотношение Смагоринского [15] –

$$k_x = k_y = m^2 \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2}, \quad (8)$$

где

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}; \quad D\psi = \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial \psi}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial \psi}{\partial z}.$$

Здесь ψ – любая из функций рассматриваемой задачи; t – время; u, v – горизонтальные, w – вертикальная компонента вектора \vec{v} скорости движения среды вдоль осей декартовой прямоугольной системы координат (x, y, z) , x, y – горизонтальные координаты, а ось Z направлена вертикально вверх; ρ – плотность воды; p – давление; T – температура воды; $\vec{\Omega}$ – вектор угловой скорости вращения Земли, направленный параллельно оси Земли к Северному полюсу; \vec{g} – сила тяжести; c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении; $\alpha = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}$ – коэффициент термического расширения;

q – соленость; M_m – скорость притока тепла от внешних источников; k_x, k_y, k_z – коэффициенты турбулентного обмена соответственно по горизонтали и вертикали; m – масштаб, пропорциональный шагу горизонтальной сетки Δs ; η – толщина верхнего квазиоднородного слоя, k_0 – эмпирическая константа, s – концентрация рассматриваемой субстанции, $F(x, y, z, t)$ – функция, описывающая распределение и мощности источников рассматриваемой субстанции. Для воды используется эмпирическое уравнение состояния [11], связывающее плотность, температуру, давление и соленость:

$$\rho(q, T, p) = \rho_o(q, T) / (1 - p / K(q, T, p)),$$

где $\rho_o(q, T)$ – плотность воды при стандартном атмосферном давлении, K – объемный модуль упругости.

Систему уравнений (1)–(8) будем рассматривать в параллелепипеде $\Omega \{x, y, z: 0 \leq x \leq X, 0 \leq y \leq Y, 0 \leq z \leq h\}$, где $x = 0, x = X, y = 0, y = Y, z = 0, z = h$ – границы области счета. На свободной поверхности водоема задаются касательное трение ветра, поток солнечной радиации и теплообмен водной поверхности с атмосферой. На дне водоема и боковой поверхности ставятся условия прилипания или непротекания с квадратичным законом трения, и задается теплообмен с дном. На границах втекания ставятся условия первого рода, а на границах вытекания – второго рода. Преобразуя уравнения (2)–(3) с помощью уравнения состояния, получим эволюционные уравнения для T и p [1].

Уравнения модели интегрируются численно в декартовой прямоугольной системе координат с применением метода фиктивных областей. Введение таких областей позволяет проводить расчеты с произвольной функцией, описывающей рельеф суши и дна водоемов. Подробно метод решения изложен в [1].

Загрязнение от основных водотоков

Распространенным видом антропогенного воздействия на водные экосистемы является загрязнение, возникающее вследствие расположения юрт вблизи водных источников и нагрузки на пастбища. Для экспериментального моделирования мы выбрали 17 основных рек (рис. 1, табл. 1), указанных в атласе оз. Хубсугул [2].



Таблица 1
Реки, втекающие в оз. Хубсугул [2]

№	Река	Длина, км	Площадь водосбора, км ²
1	Жиглэг-Гол	10,4	57,8
2	Увер-Хачим-Гол	15,0	105,0
3	Ходон-Гол	7,9	74,7
4	Хонгор-Бооше-Гол	34,0	174,0
5	Их-Хороо-Гол	50,0	566,0
6	Жаргалант-Гол	16,0	65,0
7	Баян-Гол	17,0	68,0
8	Ханх-Гол	45,0	517,0
9	Той-Гол	17,0	80,0
10	Тураг-Гол	63,0	15,7
11	Шогнуул-Гол	31,9	95,9
12	Ноен-Гол	4,6	13,1
13	Сэвсуулийн-Гол	23,0	140,0
14	Их-Далбайн-Гол	27,0	161,0
15	Борсог-Гол	11,0	69,0
16	Алаг-Цар-Гол	2,3	16,3
17	Жарай-Гол	–	–

Рис. 1. Географическое положение рек

Приведем результаты численных экспериментов. Расчеты проводились для сетки с шагами: по горизонтали – 1000 м, по вертикали – 20 м. На рисунках 2 и 3 даны глубины и температуры поверхностного слоя воды [2] оз. Хубсугул.

Рисунок 4 характеризует смоделированную общую циркуляцию вод и распространение загрязнений в верхних слоях оз. Хубсугул в летне-осенний период. Вследствие действия силы Кориолиса циркуляция имеет циклонический характер, как и во всех крупных и глубоких озерах Северного полушария. При этом в пределах единого циклонического круговорота в каждой котловине образуются вихри. Течения в центральных областях характеризуются пониженными скоростями. Приведенная схема течений образуется

постепенно в течение всего летне-осеннего периода (рис. 4, а). В конце безледного периода сформировавшиеся в поверхностном слое преобладающие течения проникают на более значительную глубину.

Расчеты распространения примесей проведены с нормированным источником единичной мощности (рис. 4, б).

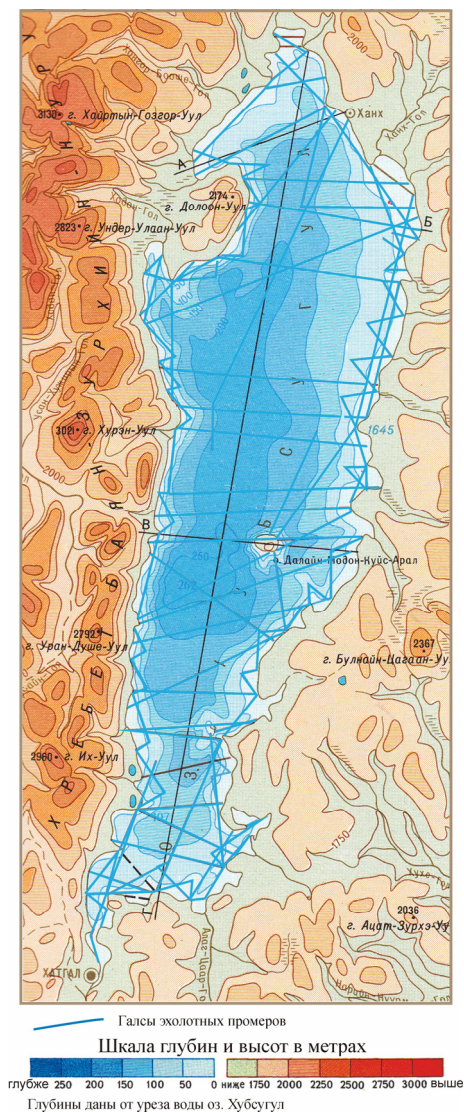


Рис. 2. Глубины оз. Хубсугул

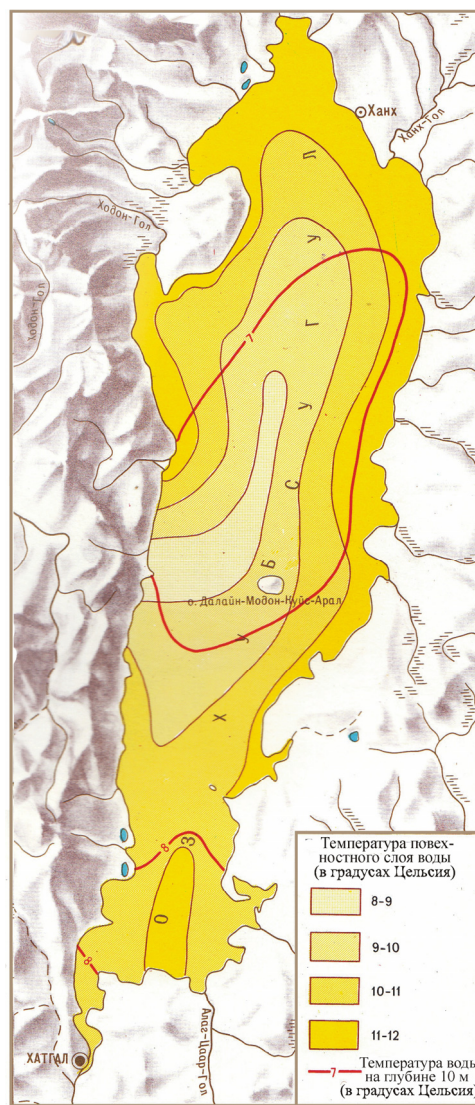


Рис. 3. Температура поверхностного слоя воды

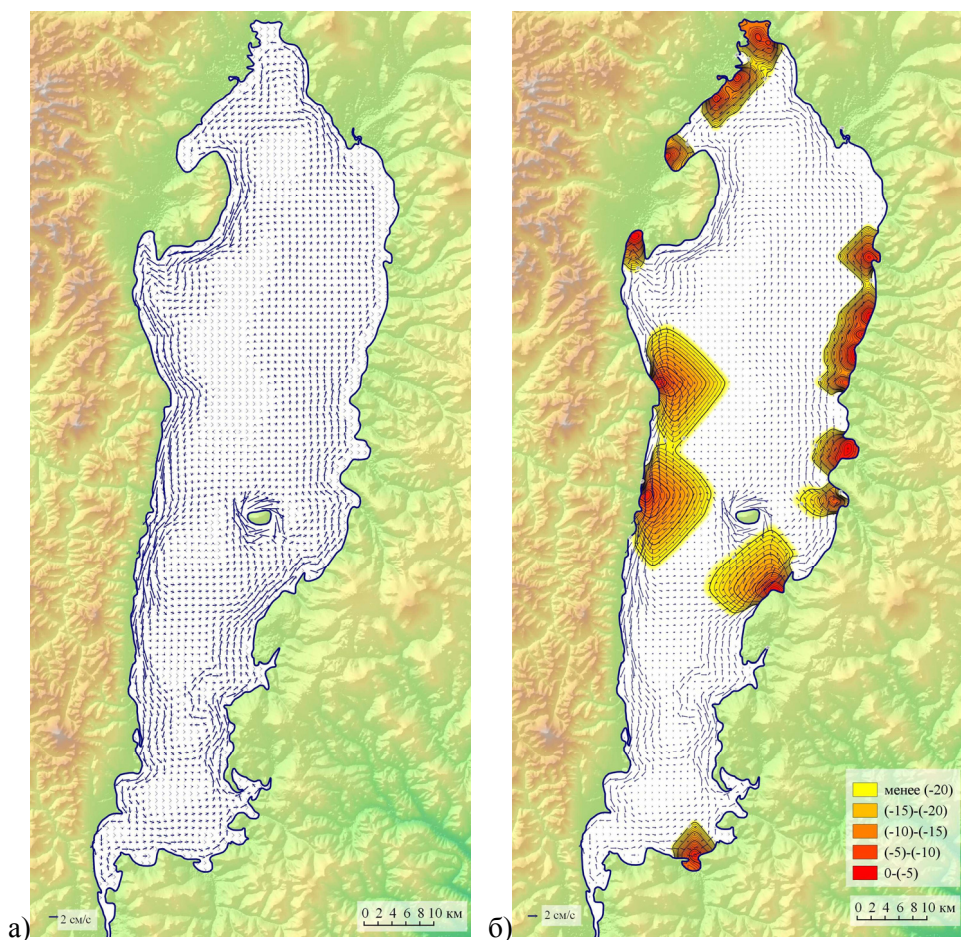


Рис. 4. Схема поверхностных течений оз. Хубсугул (а) и распространения загрязнений от основных водотоков (б). Изолинии построены в логарифмической шкале. Числа со знаком «минус» представляют показатель степени 10

Загрязнение от турбаз

По данным исследований [12], проведенных ученым Ч. Жавзан и другими в 2006–2008 гг., прибрежная зона оз. Хубсугул загрязнена в местах, где расположено много турбаз (Жанхай, Модот булан, Тойлогт, Онгилог) и сомоны Ханх и Хатгал. В этих местах содержание аммония (как одного из показателей загрязнения воды бытовыми отходами) увеличивается (рис. 5).

По данным 2010 г. в Хубсугульском национальном парке расположено более 50 (654,4 га) туристических баз [9]. Для экспериментального моделирования мы выбрали 18 турбаз, находящихся близко к берегу озера (рис. 6). В таблице 2 приведены данные о турбазах.

На рисунке 7 приведены результаты расчетов загрязнения озера от турбаз.

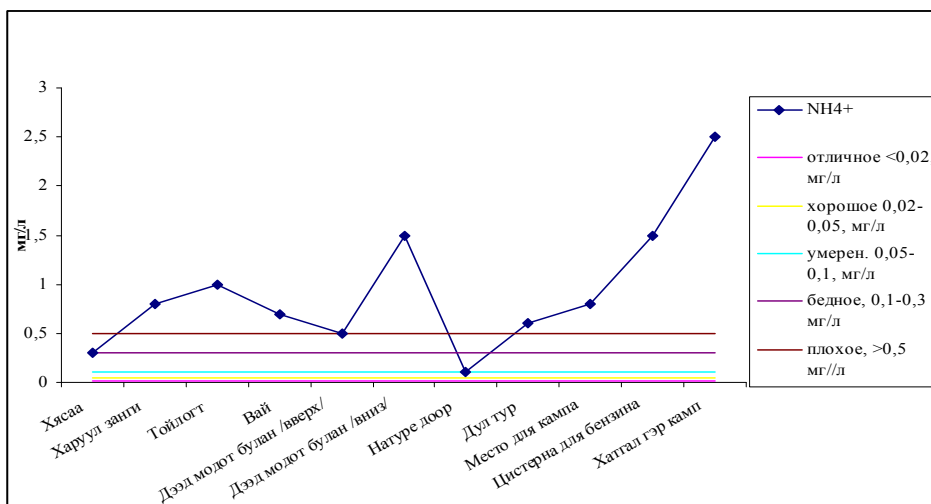


Рис. 5. Содержание аммония в воде западного берега оз. Хубсугул и соответствие со стандартами качества поверхностной воды 143/а/352 1997 г.



Рис. 6. Местоположение турбаз

Таблица 2
Количество юрт на турбазах [10; 14; 16]

№	Название	Количество юрт
1	Ласт фронтер	50
2	Мунгун эрэг	20
3	Жанхай	150
4	Натуре доор	20
	Далай тур	34
5	Хувсугул сор	30
6	Мунх-Ундраа	20
	Хангарьд	20
	Хантайга	20
	Хубсугул Эко тур	40
7	Хубсугул далай	60
	Хубсугул дул	20
8	Далай ээж	20
9	Тойлогт	82
10	Хирвэслэг	22
	Сакура	40
11	Харуул занги	20
12	Дулгуун-Уут	20

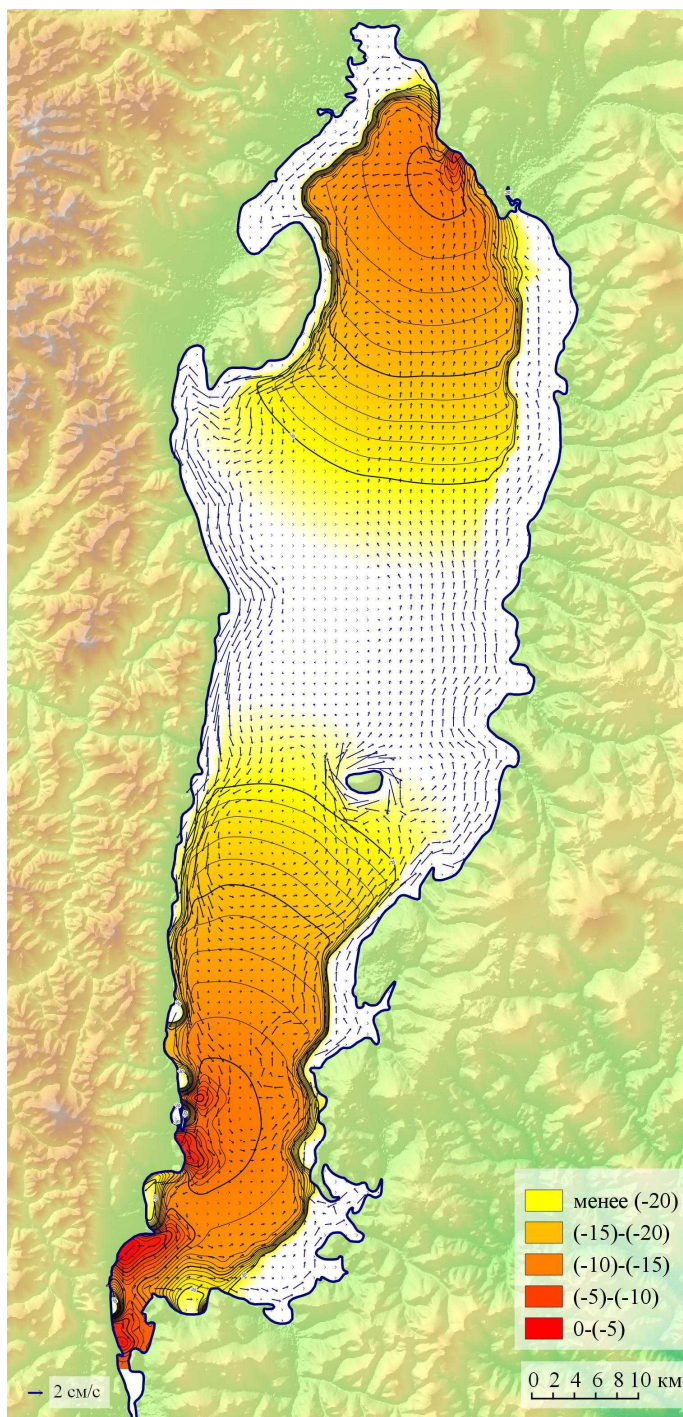


Рис. 7. Распространение загрязнений от турбаз. Обозначения такие же, что и на рис. 4

Моделирование аварийных ситуаций

Другими опасными источниками загрязнения являются нефтепродукты, транспортируемые через озеро, выбросы различных транспортов, органические загрязнители, попадающие в озеро с поверхности земли и загрязненных почв, твердые бытовые отходы и сточная вода сомонов Ханх и Хатгал, навоз, долговременные загрязнители, распространяющиеся от утонувшего в озере транспорта с бензиновым двигателем. 1 т нефтепродуктов, попавшая на поверхность озера, за короткий срок распространяется на площади 10–15 км². Нефтепродукты не окисляются и на поверхности воды дрейфуют долгое время [12].

За последние 50 лет на оз. Хубсугул происходили многочисленные аварии и утонуло более 45 транспортных средств с разными грузами. 70 % из них имели бензиновые двигатели. Большинство аварий происходило в холодное время года, когда автомобили пытались перевозить груз по льду озера. В таблице 3 представлены некоторые данные об авариях, при которых возникла угроза утечек нефтепродуктов.

Таблица 3

Транспортные средства, утонувшие в оз. Хубсугул [17]

№	Дата	Марка машины	Место аварии	Масса, т
1	1970	ЗИЛ 130	Дулаан уул	6
2	1978	Урал-375	Борсогтын гол	10
3	1979	ДТ-75 трактор	Баруун хэрвэстийн узуур	10
4	1990	МАЗ	Хачимын гол	15
5	1990	УАЗ-69	Хачим орчим	2
6	1990	ЗИЛ 130	Саатын узуур	6
7	1990	ЗИЛ 130	Агтын гол	10
8	1991	ЗИЛ 130	Хачимын гол	30
9	1993	Лодка	Удийн ам	10
10	1995	Судно «Сүхэ-Батор»	Пос. Хатгал	300
11	1996	ЗИЛ 130	Саатын узуур	20
12	2002	ЗИЛ 130	Жиглэгийн цагаан даваа	6
13	2002	УАЗ-52	Долоон уулын урд Дугэрдэг	2
14	2007	Судно «Дыбовский»	Пос. Ханх	10/60–80л/

В 2007 г. вблизи порта Ханх затонуло судно «Дыбовский» СО РАН. Чтобы избежать последствий загрязнения озера нефтепродуктами, бензин в двигателе судна заморозили. Но во время этой аварии разлилось 60–80 л бензина.

На рисунке 8 показано распространение примеси в начальный период (рис. 8, а) и после замораживания бензина в двигателе судна (рис. 8, б).

После этой аварии инспекционная служба Монголии определила, что качество воды на месте аварии сильно ухудшилось и по классификации Стандарта качества поверхностной воды было отнесено к 5 уровню, т. е. вода сильно загрязнена.

Заключение

Вопрос охраны оз. Хубсугул от загрязнений должен быть всегда в центре внимания.

Предложенная модель для стратифицированных водоемов, с одной стороны, позволяет описать крупномасштабные процессы (например, действие силы Кориолиса) в озерах, имеющих большие размеры, а с другой – мезомасштабные явления, например такие как термический бар, формирующий вертикальный водообмен весной и осенью вследствие различной стратификации воды в прибрежных и центральных частях водоема. Модель может быть применена и для решения различных экологических задач, требующих знания детальных гидрологических характеристик.

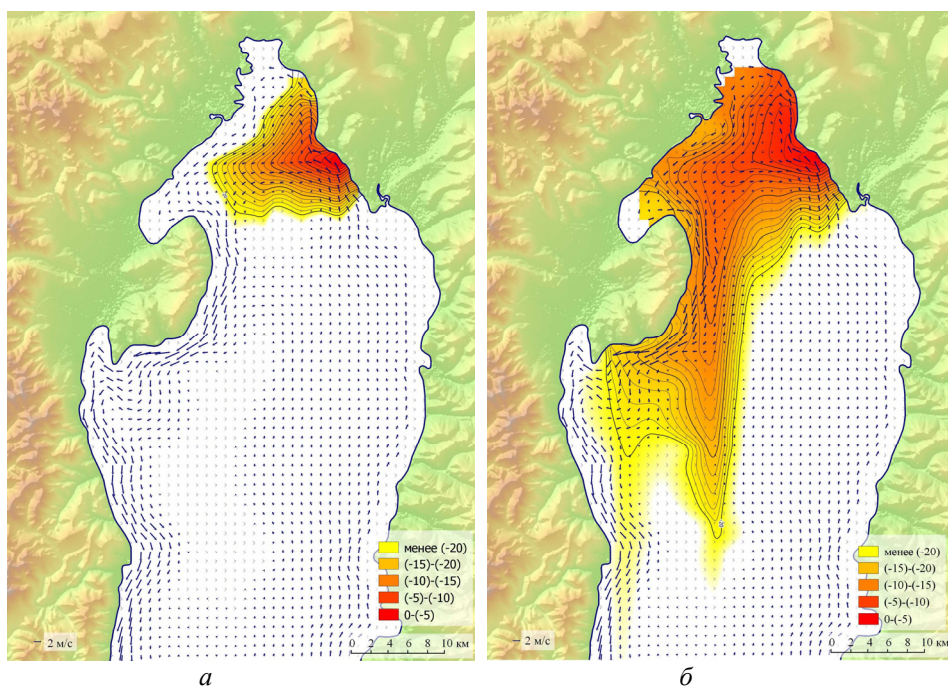


Рис. 8. Распространение загрязнений при аварийной ситуации. Обозначения такие же, что и на рис. 4

Список литературы

1. Аргучинцев В. К. Моделирование мезомасштабных гидротермодинамических процессов и переноса антропогенных примесей в атмосфере и гидросфере региона оз. Байкал / В. К. Аргучинцев, А. В. Аргучинцева. – Иркутск : Иркут. гос. ун-т, 2007. – 255 с.
2. Атлас озера Хубсугул [Карты]. – М. : ГУГК, 1989. – 119 с.
3. Калацкий В. И. Моделирование вертикальной термической структуры деятельного слоя океана / В. И. Калацкий. – Л. : Гидрометеоиздат, 1978. – 215 с.
4. Кочергин В. П. Мониторинг гидрофизических полей океана / В. П. Кочергин, И. Е. Тимченко. – Л. : Гидрометеоиздат, 1987. – 279 с.

5. Марчук Г. И. Математическое моделирование циркуляции океана / Г. И. Марчук, А. С. Саркисян. – М. : Наука, 1988. – 302 с.
6. Обухов А. М. Турбулентность в температурно-неоднородной атмосфере / А. М. Обухов // Тр. Ин-та теорет. геофизики АН СССР. – 1946. – Т. 1. – С. 95–115.
7. Обухов А. М. Турбулентность и динамика атмосферы / А. М. Обухов. – Л. : Гидрометеиздат, 1988. – 413 с.
8. Оюунгэрэл Б. Отражение глобального потепления в изменении озера Хубсугул / Б. Оюунгэрэл // Вестн. Бурят. гос. ун-та. – 2011. – С. 190–192.
9. Оюунгэрэл Б. Монгол улсын тусгай хамгаалалтай газар нутгийн менежментийн өнөөгийн байдал: Хөсгөл нуурын БЦГ-ын жишээ дээр [Сегодняшнее состояние менеджмента ООПТ Монголии: на примере Хубсугульского национального парка] / Б. Оюунгэрэл, О. Мунхдулам // Охрана, исследование и мониторинг охраняемых территорий Прихубсугуля – настоящее и будущее. – Улаанбаатар : Эдмон, 2010. – С. 157–166 (на монг. яз.).
10. Аялал жуулчлалын үйлчилгээний байгууллагуудын лавлах (справочник компании по туризму и сервису). – Улаанбаатар, 2010. – С. 77–84 (на монг. яз.).
11. Chen C. T. Precise thermodynamic properties for natural waters covering only the limnological range / C. T. Chen, F. J. Millero // *Limnol. Oceanogr.* – 1986. – Vol. 31, N 3. – P. 657–662.
12. Хөвсгөл нуур түүний цутгал голуудын усны чанар, загасны судалгаа (Особенности воды озера Хубсугул и притоков рек, изучение рыб) / Ч. Жавзан, Б. Мэндсайхан, Б. Цэнгэлмаа, А. Саулегул // Охрана, исследование и мониторинг охраняемых территорий Прихубсугуля – настоящее и будущее. – Улаанбаатар : Эдмон, 2010. – С. 49–57 (на монг. яз.).
13. Жамбаажамц Ц. Ховсгол орчмын уур амьсгал (Климат Прихубсугуля: Исследование левого побережья озера Хубсугул) / Ц. Жамбаажамц // Зуун эргийн мэдээ. Улан-Батор. – 1993. – № 5. – С. 3 (на монг. яз.).
14. Мичио Кумагай <http://www.mongolnews.mn/p/45117> (на монг. яз.).
15. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations: 1. The basic experiment / J. Smagorinsky // *Mon. Weather Rev.* – 1963. – Vol. 91, N 2. – P. 99–164.
16. Tourist camps around hatgal (Карты турбаз аймака Хубсугул) 1:1 100 000 и 1:200 000. – Улан-Батор : Центр турист. информ. Хубсугул, 2010.
17. Хөвсгөл далайд живсэн автомашинуудын байршлыг тогтоолоо [Определены местоположения транспортных средств, утонувших в оз. Хубсугул] [Электронный ресурс]. – URL: http://www.inet.mn/?vfile=14&vmet_id=52160&vmet_main=1322 (на монг. яз.).

Numerical Modeling of Currents and Transfer of Impurities in Lake Khubsugul (Hovsgol)

V. K. Arguchintsev, A. V. Arguchintseva, Bat-Erdene Ariunsanaa,
A. A. Makarov

Abstract. The paper reflects the results of modeling of currents and dissemination of contaminants from rivers, tourist centers and in emergency situations for Lake Khubsugul.

Keywords: modeling, currents, impurity, rivers, tourist centers, Lake Khubsugul.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ И ПЕРЕНОСА ПРИМЕСЕЙ В ОЗ. ХУБСУГУЛІЗ

Аргушинцев Валерий Куприянович
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой метеорологии и охраны
атмосферы
Иркутский государственный университет
664003, Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: (3952) 52–10–94, 52–10–88

Arguchintsev Valery Kupriyanovich
Doctor of Sciences (Technics), Professor,
Head of the Department of Meteorology
and protection of the atmosphere
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003
tel.: (3952) 52–10–94, 52–10–88

Аргушинцева Алла Вячеславовна
доктор технических наук, профессор,
декан географического факультета
Иркутский государственный университет
664003, Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: (3952) 42–56–84

Arguchintseva Alla Vyacheslavovna
Doctor of Sciences (Technics), Professor,
Dean, Faculty of Geography
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003
tel.: (3952) 42–56–84

Бат-Эрдэнийн Ариунсанаа
аспирант, преподаватель
Иркутский государственный университет
664003, Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: 89021721990

Bat-Erdene Ariunsanaa
Postgraduate, Lecturer
Irkutsk State University,
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003
tel.: 89021721990

Макаров Алексей Александрович
зав. лабораторией информационно-
технического обеспечения
Иркутский государственный университет
664003, Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: (3952) 52–10–86

Makarov Alexey Aleksandrovich
Head of the Laboratory of Information
and Technology Services
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003
tel.: (3952) 52–10–86