

## Влияние тепловых потоков на распределение фитопланктона в пресноводном озере

Б.О. Цыденов\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 23.04.2021 г.

На примере Баргузинского залива оз. Байкал методами математического моделирования исследована роль тепловых потоков в развитии биомассы фитопланктона в период прогревания водоема. Результаты вычислительных экспериментов показали влияние потоков длинноволновой радиации, явного и скрытого тепла на продуцирование фитопланктона в верхних слоях водоема. Установлено, что наибольшая концентрация фитопланктона в заливе локализована на некотором удалении от устья р. Баргузин.

*Ключевые слова:* тепловые потоки, фитопланктон, экосистема водоема, численное моделирование, Баргузинский залив, озеро Байкал; heat fluxes, phytoplankton, lake ecosystem, numerical modeling, Barguzin Bay, Lake Baikal.

### Введение

Развитие гидрофизических и гидробиологических процессов в водоеме происходит под непрерывным влиянием атмосферных факторов. Известно, что теплообмен между озером и атмосферой осуществляется преимущественно через радиационные и турбулентные потоки тепла [1, 2]. Они играют ключевую роль в вегетации фитопланктона в периоды прогревания водоема [3].

К радиационным потокам относятся потоки коротковолнового (длина волн от 0,1 до 4 мкм) и длинноволнового (от 4 до 120 мкм) излучения. Солнечная радиация, поступающая на поверхность Земли, на 99% является коротковолновой, поэтому эти два названия часто отождествляются. Общая длинноволновая радиация на границе раздела «вода–воздух» состоит из нисходящего излучения от атмосферы и восходящего излучения от водной поверхности [1]. Турбулентный перенос тепла включает в себя перенос скрытого (вследствие испарения воды) и явного (за счет температурного различия между водной поверхностью и приповерхностным воздухом) тепла. В настоящее время для изучения радиационных и турбулентных процессов в атмосфере применяют инструментальные методы [4], базы данных реанализов [5, 6] и математическое моделирование [2, 7]. Несмотря на предпочтительность использования первого подхода наиболее часто обращаются к остальным методам ввиду отсутствия доступной базы инструментальных измерений [6].

Следует заметить, что среди основных причин цветения фитопланктона также выделяют избыточное количество биогенных элементов (соединения

азота и фосфора) и застой воды [3]. В последние годы в литоральной зоне оз. Байкал наблюдается активный рост водорослей рода спиригира [8, 9]. В связи с этим изучение влияния радиационных и турбулентных потоков тепла на изменение биомассы водоема является актуальной задачей.

Цель настоящей работы – исследование влияния тепловых потоков на развитие фитопланктона в Баргузинском заливе оз. Байкал на основе математической модели, учитывающей наличие азота и фосфора в воде.

### Математическая модель

Натурные наблюдения показывают, что в периоды прогревания озера основные изменения термодинамических характеристик происходят от берега к центру водоема. При этом характеристики в направлении, параллельном берегу, как правило, достаточно однородны. Поэтому при моделировании процессов в озерах умеренных широт в весенне-летний период удобно использовать 2.5D-подход [10, 11, 12], который основан на приближении, переводящем задачу в двумерную, но учитывающем три компонента вектора скорости. Важно здесь заметить, что компонента скорости вдоль однородного направления (параллельно береговой линии) в результате влияния силы Кориолиса может в некоторых областях доминировать над другими компонентами. В настоящей работе также отдается предпочтение 2.5D-модели, которая состоит из термогидродинамического [13, 14] и экосистемного [15] блоков.

Термогидродинамический блок включает в себя уравнения количества движения (1)–(3), неразрывности (4), температуры (5) и солености (6):

\* Баир Олегович Цыденов (tsydenov@iao.ru).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial u w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) + 2\Omega_x v - 2\Omega_y w; \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial u v}{\partial x} + \frac{\partial w v}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) + 2\Omega_x w - 2\Omega_z u; \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial u w}{\partial x} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{g p}{\rho_0} + 2\Omega_y u - 2\Omega_x v; \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial u T}{\partial x} + \frac{\partial w T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho_0 c_p} \frac{\partial H_{sol}}{\partial z}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial u S}{\partial x} + \frac{\partial w S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial S}{\partial z} \right), \quad (6)$$

где  $u, v$  – горизонтальные компоненты скорости;  $w$  – вертикальная компонента скорости;  $\Omega_x, \Omega_y$  и  $\Omega_z$  – компоненты вектора угловой скорости вращения Земли;  $g$  – ускорение свободного падения;  $c_p$  – удельная теплоемкость;  $T$  – температура;  $S$  – солесность;  $p$  – давление;  $\rho_0$  – плотность воды при стандартном атмосферном давлении, характерной температуре  $T_L$  и характерной солесности  $S_L$  воды в озере;  $K_x$  и  $K_z$  – коэффициенты турбулентной вязкости в соответствующих направлениях. Замыкание системы уравнений осуществляется с помощью двухпараметрической  $k$ – $\omega$  модели турбулентности Уилкокса [16].

Поглощение коротковолновой радиации  $H_{sol}$  рассчитывается по закону Бугера–Ламберта–Бэра:

$$H_{sol} = H_{Ssol,0} (1 - r_s) \exp(-\epsilon_{abs} d), \quad (7)$$

где  $r_s \approx 0,2$  – коэффициент отражения воды;  $\epsilon_{abs} \approx 0,3 \text{ м}^{-1}$  – коэффициент поглощения солнечной радиации в воде;  $d$  – глубина, м. Приток солнечной

радиации на поверхность озера  $H_{Ssol,0}$  определяется соотношением

$$H_{Ssol,0} = \begin{cases} S_0 (a_g - a_w) \cos \zeta [a(C) + b(C) \ln(\cos \zeta)], & \cos \zeta > 0; \\ 0, & \cos \zeta \leq 0, \end{cases} \quad (8)$$

здесь  $S_0 \approx 1367 \text{ Вт/м}^2$  – солнечная постоянная;  $a(C)$  и  $b(C)$  – эмпирические коэффициенты [17], зависящие от степени покрытия небесного свода облаками  $C$ ;  $\zeta$  – зенитный угол Солнца; эмпирические функции  $a_g$  и  $a_w$  – молекулярное рассеяние и поглощение излучения парами воды и оксидами углерода соответственно [18].

Экосистемный блок основан на моделях Фашама и др. [19], Феннель и др. [20], Хофман и др. [21], Гана и др. [22] и включает в себя 10 прогностических переменных: нитрат (9), фосфат (10), аммоний (11), хлорофилл  $a$  (12), фитопланктон (13), зоопланктон (14), мелкий (15) и крупный (16) нитратный детрит, а также мелкий (17) и крупный (18) фосфатный детрит:

$$\begin{aligned} \frac{\partial [N]}{\partial t} + \frac{\partial u [N]}{\partial x} + \frac{\partial w [N]}{\partial z} = & \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial [N]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) - \mu_{\max} f(I) [\text{Phyto}] \left( \sigma_N \frac{[N]}{k_N + [N]} \cdot \frac{1}{1 + [A]/k_A} + \right. \\ & \left. + \sigma_P \frac{[N]}{[N] + [A]} \cdot \frac{[P]}{k_P + [P]} \right) + n[A]; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial [P]}{\partial t} + \frac{\partial u [P]}{\partial x} + \frac{\partial w [P]}{\partial z} = & \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial [P]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial [P]}{\partial z} \right) - \mu_{\max} f(I) [\text{Phyto}] \left( \sigma_N \left\{ \frac{[N]}{k_N + [N]} \cdot \frac{1}{1 + [A]/k_A} + \frac{[A]}{k_N + [A]} \right\} \times \right. \\ & \left. \times r_{PN} + \sigma_P \frac{[P]}{k_P + [P]} r_{PN} \right) + l_{BM} r_{PN} [Zoo] + l_E r_{PN} \frac{[\text{Phyto}]^2}{k_{\text{Phyto}} + [\text{Phyto}]^2} \beta [Zoo] + r_{SDP} [\text{SDP}] + r_{LDP} [\text{LDP}]; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial[A]}{\partial t} + \frac{\partial u[A]}{\partial x} + \frac{\partial w[A]}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial[A]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial[A]}{\partial z} \right) - \mu_{\max} f(I) [\text{Phyto}] \left( \sigma_N \frac{[A]}{k_A + [A]} + \sigma_P \frac{[A]}{[N] + [A]} \cdot \frac{[P]}{k_P + [P]} \right) - \\ - n[A] + l_{\text{BM}}[\text{Zoo}] + l_E \frac{[\text{Phyto}]^2}{k_{\text{phyto}} + [\text{Phyto}]} \beta [\text{Zoo}] + r_{\text{SDN}}[\text{SDN}] + r_{\text{LDN}}[\text{LDN}]; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial[\text{Chl}]}{\partial t} + \frac{\partial u[\text{Chl}]}{\partial x} + \frac{\partial w[\text{Chl}]}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial[\text{Chl}]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial[\text{Chl}]}{\partial z} \right) + \rho_{\text{Chl}} \mu[\text{Chl}] - m_{\text{Phyto}}[\text{Chl}] - \\ - \tau([\text{SDN}] + [\text{Phyto}])[\text{Chl}] - g_{\max} \frac{[\text{Phyto}]^2}{k_{\text{phyto}} + [\text{Phyto}]} [\text{Zoo}] \frac{[\text{Chl}]}{[\text{Phyto}]}; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial[\text{Phyto}]}{\partial t} + \frac{\partial u[\text{Phyto}]}{\partial x} + \frac{\partial w[\text{Phyto}]}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial[\text{Phyto}]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial[\text{Phyto}]}{\partial z} \right) + \mu[\text{Phyto}] - \\ - m_{\text{Phyto}}[\text{Phyto}] - \tau([\text{SDN}] + [\text{Phyto}])[\text{Phyto}] - g_{\max} \frac{[\text{Phyto}]^2}{k_{\text{phyto}} + [\text{Phyto}]} [\text{Zoo}]; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial[\text{Zoo}]}{\partial t} + \frac{\partial u[\text{Zoo}]}{\partial x} + \frac{\partial w[\text{Zoo}]}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial[\text{Zoo}]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial[\text{Zoo}]}{\partial z} \right) + g_{\max} \frac{[\text{Phyto}]^2}{k_{\text{phyto}} + [\text{Phyto}]} \beta [\text{Zoo}] - \\ - l_{\text{BM}}[\text{Zoo}] - l_E \frac{[\text{Phyto}]^2}{k_{\text{phyto}} + [\text{Phyto}]} \beta [\text{Zoo}] - m_{\text{Zoo}}[\text{Zoo}]^2; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial[\text{SDN}]}{\partial t} + \frac{\partial u[\text{SDN}]}{\partial x} + \frac{\partial w[\text{SDN}]}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial[\text{SDN}]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial[\text{SDN}]}{\partial z} \right) + g_{\max} \frac{[\text{Phyto}]^2}{k_{\text{phyto}} + [\text{Phyto}]} (1 - \beta) [\text{Zoo}] + \\ + m_{\text{Zoo}}[\text{Zoo}]^2 + m_{\text{Phyto}}[\text{Phyto}] - \tau([\text{SDN}] + [\text{Phyto}])[\text{SDN}] - r_{\text{SDN}}[\text{SDN}]; \end{aligned} \quad (15)$$

$$\frac{\partial[\text{LDN}]}{\partial t} + \frac{\partial u[\text{LDN}]}{\partial x} + \frac{\partial w[\text{LDN}]}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial[\text{LDN}]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial[\text{LDN}]}{\partial z} \right) + \tau([\text{SDN}] + [\text{Phyto}])^2 - r_{\text{LDN}}[\text{LDN}]; \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial[\text{SDP}]}{\partial t} + \frac{\partial u[\text{SDP}]}{\partial x} + \frac{\partial w[\text{SDP}]}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial[\text{SDP}]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial[\text{SDP}]}{\partial z} \right) + g_{\max} \frac{[\text{Phyto}]^2}{k_{\text{phyto}} + [\text{Phyto}]} r_{\text{PN}} (1 - \beta) [\text{Zoo}] + \\ + m_{\text{Zoo}} r_{\text{PN}} [\text{Zoo}]^2 + m_{\text{Phyto}} r_{\text{PN}} [\text{Phyto}] - \tau([\text{SDN}] + [\text{Phyto}])[\text{SDP}] - r_{\text{SDP}}[\text{SDP}]; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial[\text{LDP}]}{\partial t} + \frac{\partial u[\text{LDP}]}{\partial x} + \frac{\partial w[\text{LDP}]}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial[\text{LDP}]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial[\text{LDP}]}{\partial z} \right) + \tau([\text{SDN}] + [\text{Phyto}]) \times \\ \times ([\text{SDP}] + r_{\text{PN}}[\text{Phyto}]) - r_{\text{LDP}}[\text{LDP}], \end{aligned} \quad (18)$$

где [N], [P], [A], [Chl], [Phyto], [Zoo] – концентрация нитратов (NO<sub>3</sub>), фосфатов (PO<sub>4</sub>), аммония (NH<sub>4</sub>), хлорофилла *a*, фитопланктона, зоопланктона соответственно; [SDN] и [SDP] – концентрация мелкого детрита для NO<sub>3</sub> и PO<sub>4</sub> соответственно; [LDN] и [LDP] – концентрация крупного детрита для NO<sub>3</sub> и PO<sub>4</sub> соответственно; *D<sub>x</sub>* и *D<sub>z</sub>* – коэффициенты турбулентной диффузии в соответствующих направлениях.

Интенсивность роста фитопланктона определяется как

$$\begin{aligned} \mu = \mu_{\max} f(I) \times \\ \times \left( \sigma_N \left( \frac{[N]}{k_N + [N]} \cdot \frac{1}{1 + [A]/k_A} + \frac{[A]}{k_A + [A]} \right) + \sigma_P \frac{[P]}{k_P + [P]} \right), \end{aligned} \quad (19)$$

где  $\mu_{\max}$  – максимальная скорость роста фитопланктона [23]:

$$\mu_{\max}(T) = \mu_0 1,066^T. \quad (20)$$

Коэффициенты  $\sigma_N$  и  $\sigma_P$  отвечают за лимитирование продуктивности водоема по основным биогенным элементам: если  $\frac{[N]}{k_N + [N]} \cdot \frac{1}{1 + [A]/k_A} + \frac{[A]}{k_A + [A]} > \frac{[P]}{k_P + [P]}$ , то  $\sigma_N = 0$  и  $\sigma_P = 1$  (фосфорное лимитирование), в противном случае  $\sigma_N = 1$  и  $\sigma_P = 0$  (азотное лимитирование).

Функция  $f(I)$  представляет связь фотосинтеза и света:

$$f(I) = \frac{\alpha I}{\sqrt{\mu_{\max}^2 + \alpha^2 I^2}}; \quad (21)$$

$$I = I_S \text{PAR} \exp\left\{-d \left(k_{\text{water}} + k_{\text{chl}} \int_d^{L_z} \text{Chl}(z) dz\right)\right\}, \quad (22)$$

где  $I_S$  – приходящий на поверхность воды свет;  $\text{PAR} = 0,43$  [20] – доля света для фотосинтеза. Параметру  $I_S$  в модели соответствует коротковолновая радиация [20].

Участвующая в синтезе хлорофилла доля роста фитопланктона определяется как

$$r_{\text{Chl}} = \frac{\theta_{\max} \mu[\text{Phyto}]}{\alpha I[\text{Chl}]}. \quad (23)$$

Скорость нитрификации вычисляется по формуле [24]:

$$n = n_{\max} \left(1 - \max\left[0; \frac{I - I_0}{k_1 + I - I_0}\right]\right), \quad (24)$$

где  $n_{\max}$  – максимальная скорость нитрификации.

Параметры, входящие в расчетные формулы экосистемного блока модели, приведены в табл. 1.

На поверхности водоема задается общий тепловой поток

$$H_{\text{net}} = H_{\text{lw}} + H_{\text{L}} + H_{\text{S}}, \quad (25)$$

состоящий из компонентов длинноволновой радиации ( $H_{\text{lw}}$ ), скрытого ( $H_{\text{L}}$ ) и явного ( $H_{\text{S}}$ ) тепла, параметризация которых осуществляется по расчетным формулам модели № 3 из [25]:

$$1) H_{\text{lw}} = \varepsilon_w \varepsilon_a \sigma (1 + 0,17C^2) T_A^4 - \varepsilon_w \sigma T^4, \quad (26)$$

где  $T_A$  – температура воздуха, К;  $T$  – температура воды, К;  $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2/\text{К}^4$  – коэффициент Стефана–Больцмана;  $\varepsilon_w \approx 0,97$  – коэффициент излучения воды; коэффициент излучения атмосферы  $\varepsilon_a$  рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_a = C_\varepsilon T_A^2,$$

здесь  $C_\varepsilon = 9,37 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-2}$  – излучательная способность воздуха;

$$2) H_{\text{L}} = f_u (e_A - e_w), \quad (27)$$

$$\text{где } f_u = 6,9 + 0,345 U_{10}^2; \quad e_w = 6,112 \exp\left(\frac{17,67 T_A^C}{T_A^C + 243,5}\right),$$

где  $e_w$  – давление насыщенного водяного пара, гПа;  $e_A = 0,01 \cdot RH e_w$  – давление водяного пара в атмосфере, гПа,  $RH$  – относительная влажность, %;  $f_u$  – коэффициент массоотдачи,  $\text{Вт/м}^2/\text{гПа}$ ;  $U_{10} = \sqrt{u_{10}^2 + v_{10}^2}$  – скорость ветра, м/с;  $T_A^C$  – температура воздуха, °C;

$$3) H_{\text{S}} = \beta f_u (T_A - T), \quad \text{где } \beta = 0,62 \text{ гПа/К}. \quad (28)$$

Таблица 1

**Биогеохимические параметры модели**

Обозначение	Наименование	Значение
$\mu_0$	Скорость роста фитопланктона при 0° С	0,59 сут <sup>-1</sup>
$k_{\text{water}}$	Коэффициент ослабления света для воды	0,04 м <sup>-1</sup>
$k_{\text{Chl}}$	Коэффициент ослабления света для хлорофилла	0,025 (мг Chl) <sup>-1</sup> м <sup>-2</sup>
$\alpha$	Начальная крутизна кривой P-I	0,025 мг С (мг Chl · Вт · м <sup>-2</sup> · сут) <sup>-1</sup>
$\theta_{\max}$	Максимальное соотношение хлорофилла к биомассе планктона	0,054 мг Chl · (мг С) <sup>-1</sup>
$r_{\text{PN}}$	Клеточное соотношение P:N	0,0625
$k_{\text{N}}$	Константа полунасыщения фитопланктона по NO <sub>3</sub>	0,8 ммоль · м <sup>-3</sup>
$k_{\text{A}}$	Константа полунасыщения фитопланктона по NH <sub>4</sub>	0,8 ммоль · м <sup>-3</sup>
$k_{\text{P}}$	Константа полунасыщения фитопланктона по PO <sub>4</sub>	0,05 ммоль · м <sup>-3</sup>
$m_{\text{Phyto}}$	Смертность фитопланктона	0,15 сут <sup>-1</sup>
$g_{\max}$	Максимальная скорость питания зоопланктона	0,6 сут <sup>-1</sup>
$\beta$	Эффективность усвоения зоопланктона по азоту	0,75
$k_{\text{Phyto}}$	Константа полунасыщения питания фитопланктона	1 ммоль N · м <sup>-3</sup>
$l_{\text{BM}}$	Скорость экскреции зоопланктона за счет основного обмена	0,1 сут <sup>-1</sup>
$l_{\text{E}}$	Скорость экскреции зоопланктона за счет видовой особенности	0,1 сут <sup>-1</sup>
$m_{\text{Zoo}}$	Смертность зоопланктона	0,025 сут <sup>-1</sup> · (ммоль N · м <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup>
$r_{\text{SDN}}$	Скорость реминерализации мелкого детрита для азота	0,03 сут <sup>-1</sup>
$r_{\text{LDN}}$	Скорость реминерализации крупного детрита для азота	0,01 сут <sup>-1</sup>
$r_{\text{SDP}}$	Скорость реминерализации мелкого детрита для фосфора	0,075 сут <sup>-1</sup>
$r_{\text{LDP}}$	Скорость реминерализации крупного детрита для фосфора	0,025 сут <sup>-1</sup>
$\tau$	Скорость коагуляции	0,05 сут <sup>-1</sup>
$n_{\max}$	Максимальная скорость нитрификации	0,05 сут <sup>-1</sup>
$I_0$	Порог ФАР для ингибирования процесса нитрификации	0,0095 Вт · м <sup>-2</sup>
$k_1$	Полунасыщение ФАР для ингибирования процесса нитрификации	0,1 Вт · м <sup>-2</sup>

## Область исследования и параметры задачи

Область исследования представляет собой вертикальное сечение Баргузинского залива оз. Байкал, начало системы координат совпадает с устьем р. Баргузин:  $53^{\circ}25'30''$  с.ш.  $108^{\circ}59'50''$  в.д. (рис. 1, *а*). Данные по рельефу дна взяты из [26] (рис. 1, *б*).

Протяженность вычислительной области – 20 км, глубина – 100 м (рис. 1, *б*). Глубина открытого участка речного стока (на левой границе) – 15 м. Расчетная область покрыта равномерной ортогональной сеткой с шагами  $h_x = 25$  м и  $h_z = 2,5$  м. Шаг по времени – 10 с.

Начальное значение температуры воды в озере задано равным  $3^{\circ}\text{C}$ , что приблизительно соответствует осредненным данным вертикального распределения температуры верхнего 100-метрового слоя в Средней котловине оз. Байкал в июне [27]. Температура воды в устье р. Баргузин монотонно растет с  $12$  до  $18^{\circ}\text{C}$ . Минерализация воды в озере составляет  $96$  мг/л [27], в реке –  $149$  мг/л [28]. Скорость течения р. Баргузин при впадении в озеро –  $0,5$  см/с. Компоненты тепловых потоков, поступающих на водное зеркало, вычислены на основе данных из архива погодных условий метеостанции с. Горячинск с 1 по 20 июня 2019 г.

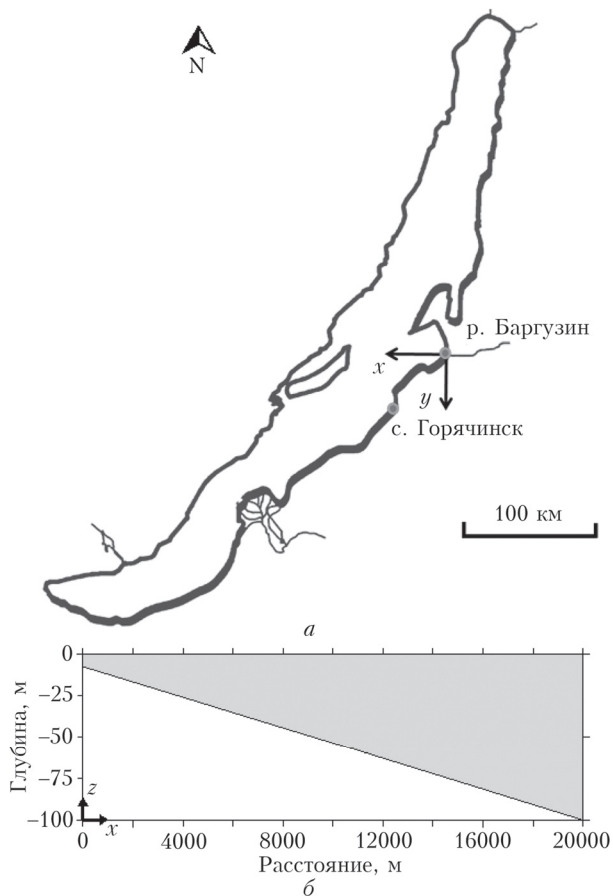


Рис. 1. Оз. Байкал: схема разреза (*а*); геометрия расчетной области (*б*)

Значения концентрации нитратов, аммония, фосфатов, хлорофилла *а*, фито- и зоопланктона в начальный момент времени приняты равными  $1,0$  ммоль/м<sup>3</sup>;  $1,0$  ммоль/м<sup>3</sup>;  $0,05$  ммоль/м<sup>3</sup>;  $0,3$  мг/м<sup>3</sup>;  $0,3$  ммоль N/м<sup>3</sup> и  $0,3$  ммоль N/м<sup>3</sup> соответственно. Концентрация для всех детритных компонентов в начальный момент времени составляет  $0,1$  ммоль N/м<sup>3</sup>. На границе раздела «река–озеро» для биологических переменных модели заданы следующие условия:  $[N]_R = 1,0$  ммоль/м<sup>3</sup>,  $[P]_R = 0,2$  ммоль/м<sup>3</sup>,  $[A]_R = 1,0$  ммоль/м<sup>3</sup>,  $[Chl]_R = 1,0$  мг/м<sup>3</sup>,  $[Phyto]_R = 0,3$  ммоль N/м<sup>3</sup>,  $[Zoo]_R = 0,3$  ммоль N/м<sup>3</sup>,  $[SDN]_R = 0,1$  ммоль N/м<sup>3</sup>,  $[LDN]_R = 0,1$  ммоль N/м<sup>3</sup>,  $[SDP]_R = 0,1$  ммоль N/м<sup>3</sup> и  $[LDP]_R = 0,1$  ммоль N/м<sup>3</sup>.

## Результаты моделирования

### 1. Тепловые потоки

Теплообмен между атмосферой и водной поверхностью в математической модели описывается посредством внутрисуточной изменчивости температуры воздуха, относительной влажности, атмосферного давления, облачности, скорости и направления ветра (согласно данным метеостанции с. Горячинск, расположенной вблизи исследуемой области). На основе этих метеорологических данных вычислены значения коротковолновой и длинноволновой радиации, потоков скрытого и явного тепла (рис. 2).

Прогрев верхних слоев происходит за счет потоков явного тепла и коротковолновой радиации, причем последний компонент вносит основной вклад в тепловой баланс водоема. В первых двух декадах июня 2019 г. диапазон изменения потока явного тепла варьируется от  $-11,6$  до  $69,9$  Вт/м<sup>2</sup> (при уменьшении температуры воздуха ниже температуры водной поверхности поток явного тепла в ночное время принимал отрицательное значение). Максимальное значение коротковолновой радиации составило  $774,1$  Вт/м<sup>2</sup>, при этом важно заметить, что на 3-и, 4-е, 11-е, 15-е, 16-е и 18-е сутки месяца пиковые значения теплового потока были значительно ниже максимумов остальных дней из-за высокой степени покрытия неба облаками. Потоки длинноволнового излучения и скрытого тепла были источниками теплопотерь водоема, и их минимумы составили  $-102,6$  и  $-152,8$  Вт/м<sup>2</sup> соответственно. Средние значения потоков коротко- и длинноволновой радиации, скрытого и явного тепла приведены в табл. 2.

Таблица 2

#### Вычисленные средние значения тепловых потоков

Тепловые потоки	Среднее значение, Вт/м <sup>2</sup>
Длинноволновая радиация	-36,3
Скрытое тепло	-32,5
Явное тепло	21,8
Коротковолновая радиация	218,1



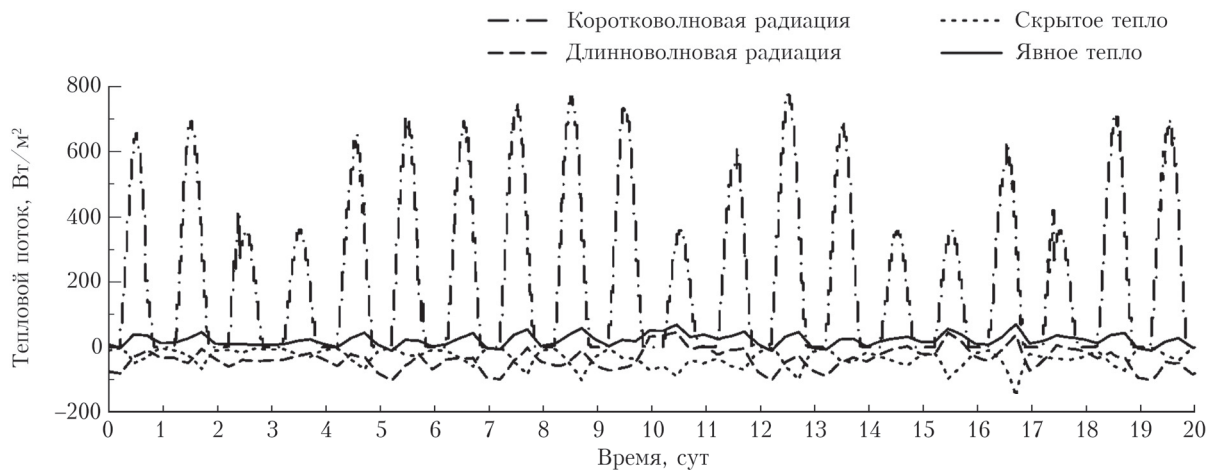


Рис. 2. Тепловые потоки с 1 по 20 июня 2019 г.

## 2. Влияние тепловых потоков на развитие фитопланктона

Для оценки роли длинноволновой радиации, скрытого и явного тепла в развитии фитопланктонной биомассы проведены расчеты без учета одного из этих компонентов (табл. 3). В вычислительном эксперименте № 1 (базовый эксперимент) заданы все компоненты тепловых потоков, в эксперименте № 2 исключен поток длинноволновой радиации, в эксперименте № 3 исключен поток скрытого тепла, в эксперименте № 4 исключен поток явного тепла.

Таблица 3

Условия вычислительных экспериментов

Номер эксперимента	Условие
1 (базовый)	учтены все компоненты тепловых потоков
2	$H_{lw} = 0$
3	$H_l = 0$
4	$H_s = 0$

Согласно распределению температуры, полученному на 16-е сутки в базовом эксперименте, поверхность открытого озера прогрелась до  $T > 7^\circ\text{C}$  (рис. 3, а); в устье р. Баргузин температура воды достигла  $15^\circ\text{C}$ . Наклонный характер изотерм и высокие градиенты температуры в приустьевой области указывают на доминирующее влияние речного притока на термическое состояние на этом участке залива. В верхнем 30-метровом слое открытого озера температура воды имеет горизонтально однородное распределение.

Результаты вычислительных экспериментов свидетельствуют об активном развитии фитопланктона на некотором удалении от устья речного притока. На 16-е сутки моделирования повышенное содержание фитопланктона сосредоточено в приповерхностном слое на расстоянии 5–6 км от берега: максимальное значение концентрации фитопланктона в эксперименте № 1 составило  $0,38 \text{ ммоль N/m}^3$  (рис. 3, б), № 2 –  $0,40 \text{ ммоль N/m}^3$  (рис. 3, в), № 3 –  $0,39 \text{ ммоль N/m}^3$  (рис. 3, г) и № 4 –  $0,37 \text{ ммоль N/m}^3$

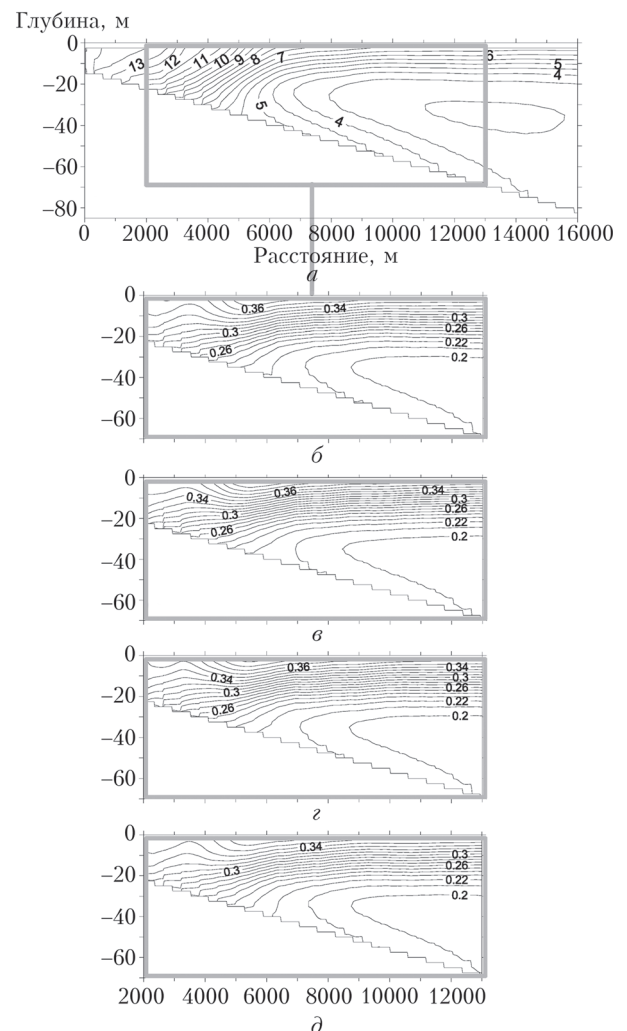


Рис. 3. Распределение температуры (в градусах Цельсия) в эксперименте № 1 (а) и фитопланктона в экспериментах № 1 (б), 2 (в), 3 (г) и 4 (д) на 16-е сутки моделирования

(рис. 3, д). В открытых водах озера биомасса фитопланктона распределена горизонтально однородно.

Сопоставление вертикальных профилей температуры и концентрации фитопланктона (рис. 4)

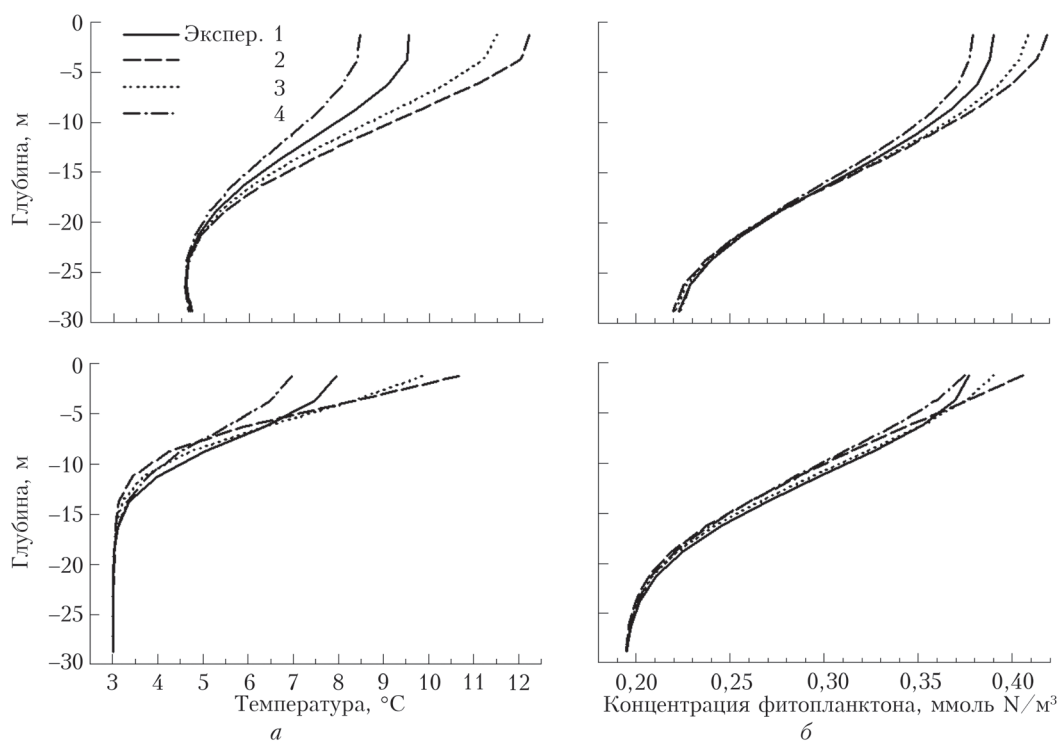


Рис. 4. Вертикальное распределение температуры (а) и концентрации фитопланктона (б) на 16-е сутки моделирования при  $x = 5,5$  (верхний ряд) и  $x = 12$  км (нижний ряд)

показывает прямую корреляцию между этими переменными: чем выше температура воды, тем выше количество фитопланктона. Причем влияние температурного режима на развитие первичной продукции сильнее выражено в мелководном участке залива; с глубиной оно уменьшается.

Результаты расчетов, полученные на разрезе  $x = 5,5$  км на 16-е сутки (рис. 4, верхний ряд), показали следующее различие: температура и концентрация фитопланктона в эксперименте № 4 ниже, а в экспериментах № 2 и 3 выше по сравнению с базовым сценарием. Важно также заметить, что на поверхности водоема это различие максимально.

Аналогичная закономерность наблюдается в верхнем 5-метровом слое на разрезе  $x = 12$  км (рис. 4, нижний ряд). Однако в нижних уровнях ( $< 7$  м) температура воды и количество фитопланктона выше (хотя и несущественно) в базовом эксперименте.

### Заключение

На основе результатов математического моделирования гидробиологических процессов в Баргузинском заливе оз. Байкал в начале лета можно сделать следующие выводы:

1. Максимальные значения количества фитопланктона на 16-е сутки сосредоточены в приповерхностном слое на расстоянии 5–6 км от устья р. Баргузин.

2. Концентрация фитопланктона коррелирует с температурой воды (при высокой температуре воды выше концентрация фитопланктона).

3. В открытых водах биомасса фитопланктона распределена горизонтально однородно.

Сравнительный анализ пространственных распределений концентрации фитопланктона, полученных в ходе вычислительных экспериментов, показал следующее:

– если не учитывать в математической модели поток явного тепла, то содержание фитопланктона ниже, чем в базовом эксперименте (в котором заданы все компоненты тепловых потоков);

– при исключении из модели потока длинноволновой радиации, а также потока скрытого тепла концентрация фитопланктона выше, чем в базовом эксперименте.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (научный проект № 19-31-60003).

1. Ji Z.-G. Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries. Hoboken, New York: Wiley-Interscience, 2008. 676 p.
2. Lorenzetti J.A., Araújo C.A.S., Curtarelli M.P. Mean diel variability of surface energy fluxes over Manso Reservoir // Inland Waters. 2015. N 5. P. 155–172.
3. Smyth T.J., Allen I., Atkinson A., Bruun J.T., Harmer R.A., Pingree R.D., Widdicombe C.E., Somerfield P.J. Ocean net heat flux influences seasonal to interannual patterns of plankton abundance // PLoS ONE. 2014. V. 9, N 6. P. e98709.
4. Beyrich F., Leps J.P., Mauder M., Bange J., Foken T., Huneke S., Lohse H., Lüdi A., Meijninger W.M.L., Mironov U.W., Zittel P. Area-averaged surface fluxes over the LITFASS region based on eddy-covariance measurements // Bound.-Lay. Meteorol. 2006. V. 121, N 1. P. 33–65.

5. *Jiménez C., Prigent C., Aires F.* Toward an estimation of global land surface heat fluxes from multisatellite observations // *J. Geophys. Res. D.* 2009. V. 114, N D6. P. D06305.
6. *Итолитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В., Соколов К.И., Харюткина Е.В.* Изменчивость составляющих теплового баланса поверхности азиатской территории России в период современного глобального потепления // *Оптика атмосф. и океана.* 2011. Т. 24, № 1. С. 22–29.
7. *Heinemann G., Kerschgens M.* Simulation of surface energy fluxes using high-resolution non-hydrostatic simulations and comparisons with measurements for the LITFASS-2003 experiment // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2006. V. 121, N 1. P. 195–220.
8. *Timoshkin O.A., Bondarenko N.A., Kulikova N.N., Lukhnev A.G., Maximova N.V., Malnik V.V., Moore M.V., Nepokrytykh A.V., Obolkina L.A., Rozhkova N.A., Shirokaya A.A., Tomberg I.V., Zaitseva E.P., Bukshuk N.A., Poberezhnaya A.E., Gula M.I., Timoshkina E.M., Volkova E.A., Zvereva Yu.M.* Protection of Lake Baikal requires more stringent, not more lenient, environmental regulation // *J. Great Lakes Res.* 2019. V. 45, N 3. P. 401–402.
9. *Volkova E.A., Bondarenko N.A., Timoshkin O.A.* Morphotaxonomy, distribution and abundance of Spirogyra (Zygnematophyceae, Charophyta) in Lake Baikal, East Siberia // *Phycologia.* 2018. V. 57, N 3. P. 298–308.
10. *Holland P.R., Kay A., Botte V.* Numerical modelling of the thermal bar and its ecological consequences in a river-dominated lake // *J. Mar. Syst.* 2003. V. 43, N 1–2. P. 61–81.
11. *Tsvetova E.A.* Effect of the Coriolis force on convection in a deep lake: numerical experiment // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 1998. V. 39, N 4. P. 593–599.
12. *Malm J.* Spring circulation associated with the thermal bar in large temperate lakes // *Nord. Hydrol.* 1995. V. 26, N 4–5. P. 331–358.
13. *Tsydenov B.O., Kay A., Starchenko A.V.* Numerical modeling of the spring thermal bar and pollutant transport in a large lake // *Ocean Model.* 2016. V. 104. P. 73–83.
14. *Tsydenov B.O.* A numerical study of the thermal bar in shallow water during the autumn cooling // *J. Great Lakes Res.* 2019. V. 45, N 3. P. 715–725.
15. *Цыденов Б.О.* Математическая модель для воспроизведения биогеохимических процессов в пресноводном озере // *Вестн. Томск. гос. ун-та. Матем. и мех.* 2020. № 65. P. 53–67.
16. *Wilcox D.C.* Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models // *AIAA J.* 1988. V. 26, N 11. P. 1299–1310.
17. *Aleksandrova M.P., Gulev S.K., Sinitsyn A.V.* An improvement of parametrization of short-wave radiation at the sea surface on the basis of direct measurements in the Atlantic // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2007. V. 32, N 4. P. 245–251.
18. *Hurley P.* The air pollution model (TAPM) Version 2. Part 1: technical description, CSIRO Atmospheric Research technical paper 55. 2002. 49 p.
19. *Fasham M.J.R., Ducklow H.W., McKelvie S.M.* A nitrogen-based model of plankton dynamics in the oceanic mixed layer // *J. Mar. Res.* 1990. V. 48, N 3. P. 591–639.
20. *Fennel K., Wilkin J., Levin J., Moisan J., O'Reilly J., Haidvogel D.* Nitrogen cycling in the Middle Atlantic Bight: Results from a three-dimensional model and implications for the North Atlantic nitrogen budget // *Global Biogeochem. Cycles.* 2006. V. 20, N 3. P. GB3007.
21. *Hofmann E., Druon J.-N., Fennel K., Friedrichs M., Haidvogel D., Lee C., Mannino A., McClain C., Najjar R., O'Reilly J., Pollard D., Previdi M., Seitzinger S., Siewert J., Signorini S., Wilkin J.* Eastern US continental shelf carbon budget: Integrating models, data assimilation, and analysis // *Oceanography.* 2008. V. 21, N 1. P. 86–104.
22. *Gan J., Lu Z., Cheung A., Dai M., Liang L., Harrison P.J., Zhao X.* Assessing ecosystem response to phosphorus and nitrogen limitation in the Pearl River plume using the Regional Ocean Modeling System (ROMS) // *J. Geophys. Res. C: Oceans.* 2014. V. 119, N 12. P. 8858–8877.
23. *Eppley R.W.* Temperature and phytoplankton growth in the sea // *Fish. Bull.* 1972. V. 70, N 4. P. 1063–1085.
24. *Olson R.J.* Differential photoinhibition of marine nitrifying bacteria: A possible mechanism for the formation of the primary nitrite maximum // *J. Mar. Res.* 1981. V. 39, N 2. P. 227–238.
25. *Tsydenov B.O., Starchenko A.V.* To the selection of heat flux parameterization models at the water-air interface for the study of the spring thermal bar in a deep lake // *Proc. SPIE.* 2015. V. 9680. DOI: 10.1117/12.2205687.
26. *Ueno H., Katano T., Nakano S.-I., Mitamura O., Abutsu K., Satoh Y., Drucker V., Sugiyama M.* Abundance and community structure of picoplankton and protists in the microbial food web of Barguzin Bay, Lake Baikal // *Aquat. Ecol.* 2005. V. 39, N 3. P. 263–270.
27. *Shimaraev M.N., Verbolov V.I., Granin N.G., Sherstyankin P.P.* Physical Limnology of Lake Baikal: A review. Irkutsk: Okayama, 1994. 81 p.
28. *Вотинцев К.К.* Гидрохимия. В кн.: Проблемы Байкала / под ред. Г.И. Галазий, К.К. Вотинцев. Новосибирск, 1978. Т. 16, № 36. С. 124–146.

***B.O. Tsydenov. The effects of heat fluxes on phytoplankton distribution in a freshwater lake.***

The role of heat fluxes in phytoplankton production during the summer heating of Barguzin Bay of Lake Baikal was explored using mathematical modeling. The results of numerical experiments showed effects of longwave radiation and latent and sensible heat fluxes on phytoplankton growth in the upper layers. This study found that the largest concentrations of phytoplankton biomass are localized at some distance from the mouth of the Barguzin River.