



<http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-3-0153>

ASSESSMENT OF GAS-HYDROTHERMAL ACTIVITY OF THE BAIKAL RIFT IN THE LAKE AREA FROM NUMERICAL EXPERIMENT DATA

V. I. Gunin

MoGeos Independent Commercial Centre for Modeling of Geological Systems, Ulan-Ude, Russia

Abstract: The Baikal rift is characterized by high heat flow, seismic activity and large thickness of sediments through which gas and hydrothermal water are intensely released into the lake water. In the area of the southern Baikal at the beginning of the 20th century, 'water pillars' were observed to reach almost a dozen metres height when earthquakes took place. This suggests potential uplift of significant amounts of gas from the lake's bottom into the atmosphere and confirms a relationship between seismicity and methane emissions. Moreover, strong emissions of gas take place in many regions of Lake Baikal, and when the lake is covered by ice, such phenomena can cause the occurrence of spots with melted ice wherein an effect of water 'boiling' is observed. In recent international space studies of the surface of ice covering Lake Baikal in spring periods, mysterious rings of 5 to 7 km in diameter were discovered. Causes and mechanisms of their occurrence have not been studied in detail yet. It is established that a ring-shaped structure results from an uplift of deep water which causes clock-wise vortex flows. Uplifting of deep water can accompany emissions of significant amounts of methane from sediments, activation of thermal vents or gas-water-mud volcanoes at the bottom of Lake Baikal.

In order to reveal causes and conditions of the above-described phenomena, the author designed a 3D model of heat-and-mass transfer in viscous medium and used it for numerical simulations. Based on the obtained results, it is established that a ring-shaped structure is formed on ice of the lake by a toroid-shaped ascending convective flow that occurs due to horizontal and vertical gradients of density, and the central part of such a flow rotates in the counter-clockwise direction (i.e. cyclonic vortex), while its periphery parts rotate in the clockwise direction (i.e. anticyclonic vortex). Both hydrothermal vents and gas emissions can produce such ascending flows. Spots with melted ice can be formed when the temperature of hydrothermal vents amounts to 30–50 °C; such a melted-ice spot can stay open as long as the hydrothermal vent is active. With an assumption of 100 % concentration of gas in the source, the numerical simulation shows that during gas release into the atmosphere, a gas pillar can reach a height of 15 metres if the source of gas is active for a period no shorter than the time required for the gas flow to ascend through the water layer and to release into the air above the water surface. An area, wherein gas is released in bubbles, can be formed in case of lasting activity of a gas source wherein the volume of gas varies from 1 % to 20 % (i.e. gas-water mix).

Key words: convection, ring structure, heat-and-mass transfer, mathematical model, numerical experiment, cyclonic / anticyclonic vortex, rift, seismic activity, lake water area, hydrothermal vents, methane, density gradient.

Recommended by V.V. Ruzhich

Citation: Gunin V.I. 2014. Assessment of gas-hydrothermal activity of the Baikal rift in the lake area from numerical experiment data. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (3), 763–775. doi:10.5800/GT-2014-5-3-0153.

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ГАЗО-ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА НА АКВАТОРИЮ ОЗЕРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В. И. Гунин

Независимый коммерческий центр моделирования геосистем «МоГеос», Улан-Удэ, Россия

Аннотация: Байкальский рифт характеризуется повышенным тепловым потоком, сейсмической активностью и мощной толщей осадочных пород, через которые в водную толщу озера идет интенсивная разгрузка газов и гидротерм. Известно, что при землетрясениях в начале XX в. на Южном Байкале наблюдались «водяные столбы» высотой в несколько метров. Это говорит о возможном подъеме со дна озера и выбросе в атмосферу значительных объемов газа и подтверждает связь между сейсмичностью и выбросами метана. Кроме того, во многих районах озера Байкал наблюдались достаточно сильные газовыделения, с которыми связывают пропарины, формирующие участки воды с кипящей поверхностью. В последние годы при изучении поверхности Земли из космоса на весеннем льду Байкала космонавтами международной научной станции были обнаружены таинственные кольца диаметром 5–7 км. Причины и механизм их образования пока детально не изучены. Было установлено, что кольцевая структура образуется при подъеме в ее центре глубинных вод, которые формируют вихревые течения, направленные по часовой стрелке. Подъем глубинных вод может быть связан с выбросами больших объемов природного горючего газа (метана) из осадочной толщи, активизацией термальных источников или деятельностью газоводогрязевых вулканов дна Байкала.

Для определения причины и условия этих явлений проведен численный эксперимент с помощью трехмерной модели тепломассопереноса в вязких средах, разработанной автором. Анализ результатов показал, что кольцевые структуры на льду озера формируются за счет восходящего конвективного потока (струи) торообразного вида, образованного горизонтальным и вертикальным градиентом плотности, центральная часть которого вращается против часовой стрелки (циклонический вихрь), а периферийная – по часовой стрелке (антициклонический вихрь). Источником восходящих струй могут быть как гидротермы, так и газовые выбросы. При температуре гидротерм в источнике 30–50 °С во льду может образоваться пропарина, действующая в течение всего времени работы источника. Для выброса газа в атмосферу до 15 м высотой время работы источника должно быть не менее времени подъема (добегания) струи газа до раздела вода – воздух при 100%-ной концентрации газа в источнике. Формирование области с выделением газа в виде пузырьков (грифон) может произойти при концентрациях газа в источнике 1–20 % от объема (газоводяная смесь) и длительной его работе.

Ключевые слова: конвекция, кольцевая структура, тепломассоперенос, математическая модель, численный эксперимент, циклонический – антициклонический вихрь, рифт, сейсмическая активность, акватория озера, гидротермы, метан, градиент плотности.

1. ВВЕДЕНИЕ

Байкальский рифт относится к континентальному типу, характеризуется повышенным тепловым потоком, сейсмической активностью и мощной толщей осадочных пород, через которые в водную толщу озера идет интенсивная разгрузка газов и гидротерм. Возможная дестабилизация с выходом свободного метана в водную толщу озера и в атмосферу ранее неоднократно обсуждалась различными исследователями. Авторы работы [Granin, Granina, 2002] проанализировали многочисленные исторические источники. В результате они предположили связь интенсивных выбросов газа с повышением сейсмической активности в данном регионе. Авторы работы [Radziminovich, Shchetnikov, 2008] провели анализ сообщений об исторических землетрясениях в Южном Прибайкалье в начале XX в. и нашли информацию о наблюдавшихся в августе 1912 г. «водяных столбах в несколько сажен высотой» на Южном Байкале, в районе станции Шарьжалгай Кругобайкальской железной дороги. Это описание говорит о возможном подъеме со дна озера и выбросе в атмосферу значительных объемов газа и подтверждает связь между сейсмичностью и выбросами метана, причем Байкал в этом месте имеет большую глубину (рис. 1).

Авторы работы [Granin, Granina, 2002] считают, что, поскольку газообразный метан характеризуется высокой растворимостью в воде, вероятность дости-

жения поверхности озера большим объемом газа из глубоководной его части крайне мала, но такое явление может иметь место в случае подъема кристаллов газогидрата к поверхности воды. Если источник метана располагался на сравнительно небольших глубинах (до 100 м), то значительный объем газа мог достичь поверхности беспрепятственно. Кроме того, во многих районах озера Байкал наблюдались газовыделения, с которыми связывают пропарины (незамерзающие зимой или появляющиеся ранней весной открытые участки воды). Эти газовыделения бывают достаточно сильными и формируют участки воды с кипящей поверхностью.

В последние годы при изучении поверхности Земли из космоса на весеннем льду Байкала были обнаружены кольца диаметром 5–7 км. Таинственные кольца на льду озера заметили космонавты международной научной станции в 2009 г. Это не только вызвало интерес исследователей, но и в СМИ данная тема обсуждалась очень бурно. Были изучены снимки предыдущих лет, и выяснилось, что подобные кольца, диаметр которых составляет несколько километров, появлялись и в весенний период 2003, 2005 и 2008 гг. Первое такое кольцо было замечено на снимке, сделанном в апреле 1999 г. Кольцо располагалось напротив мыса Крестовский (недалеко от поселка Бугульдейка). В следующий раз аналогичное ледовое явление было зафиксировано на том же месте в апреле 2003 г., а затем в апреле 2005 г. В 2008 г. кольца появились уже в двух местах:

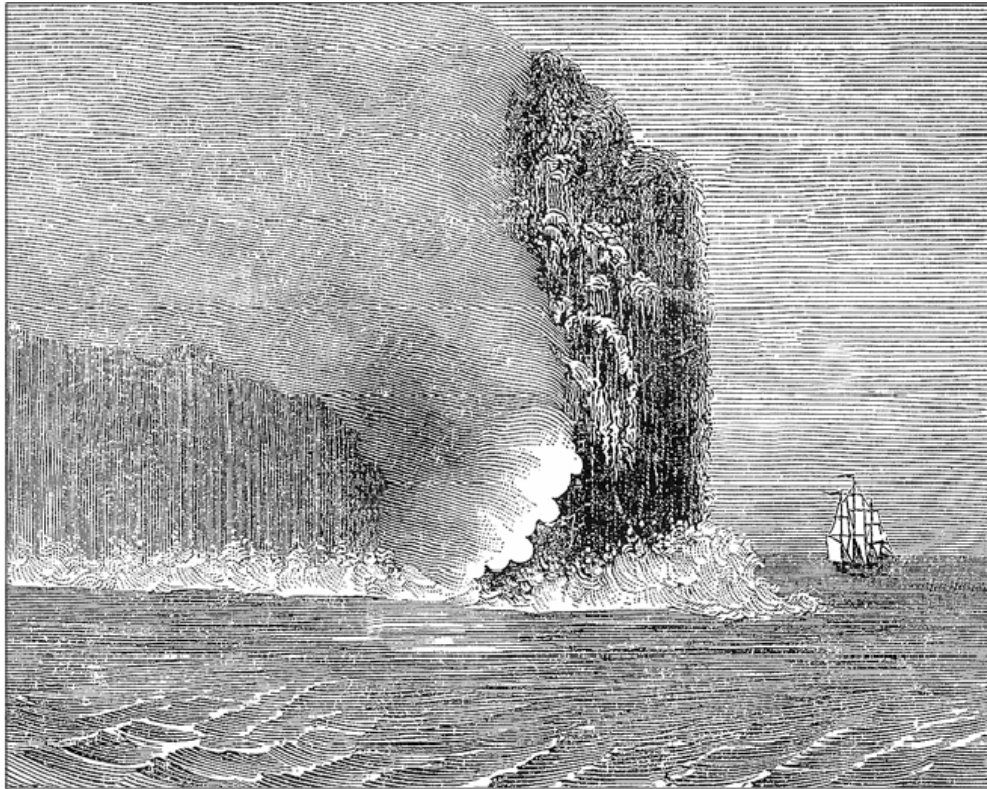


Рис. 1. Подводное извержение со старинной гравюры.

Fig. 1. An ancient gravure showing an underwater eruption.

опять в районе мыса Крестовский и, впервые, в районе поселка Турка. В 2009 г. зафиксировано два кольца западнее мыса Нижнее Изголовье полуострова Святой Нос и в южной оконечности Байкала (рис. 2). Причины и механизм образования кольцевых ледовых явлений в настоящее время пока детально не изучены. Предположительно, образование кругов связано с подъемом глубинных вод, при котором вертикальная стратификация водной толщи озера меняется и генерируется кольцевое течение [Bulletin..., 2011].

Для изучения объектов, которое началось в 2009 г., Президиумом РАН были выделены деньги на интеграционный проект. В рамках данного проекта к исследованию таинственных колец были привлечены ученые Лимнологического института, Института динамики систем и теории управления СО РАН. Во время исследований в апреле 2009 г. в западной части Южного Байкала были отобраны ледовые керны, измерялось вертикальное распределение температур в водной толще. Было установлено, что кольцевая структура образуется при подъеме в ее центре глубинных вод, которые формируют вихревые течения, направленные по часовой стрелке. Таким образом, в центре круга появляется заглублиение поверхностей и наблюдается повышение температуры подледной воды. На периферии же – в двух километрах от центра, где усиливается течение, – лед утончается. Подтаявший лед напитывает-

ся водой, и на поверхности льда проявляется темное кольцо. Впоследствии в пределах образовавшегося круга лед сходит быстрее, чем в близлежащих участках акватории (рис. 3).

Подъем глубинных вод может быть связан с выбросами больших объемов природного горючего газа (метана) из осадочной толщи дна Байкала. Кроме того, кольцевые структуры могут образоваться при активизации термальных источников или деятельности газоводогрязевых вулканов на дне Байкала. Вероятно, такие процессы происходят за счет сейсмической деятельности и тектонических движений в Байкальской рифтовой системе [Petrov, 2011].

Возникает вопрос, каковы причины и условия подъема глубинных вод, формирующих кольцевые структуры на льду озера Байкал, и какие объемы газа при подъеме со дна озера могут сформировать значительные выбросы в атмосферу, а какие – только незамерзающие полыньи? В работе, на основе результатов численного эксперимента, дана оценка возможных причин и условий развития этих процессов.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И СХЕМАТИЗАЦИЯ

Для решения этой задачи проведен численный эксперимент с помощью трехмерной модели тепломассо-

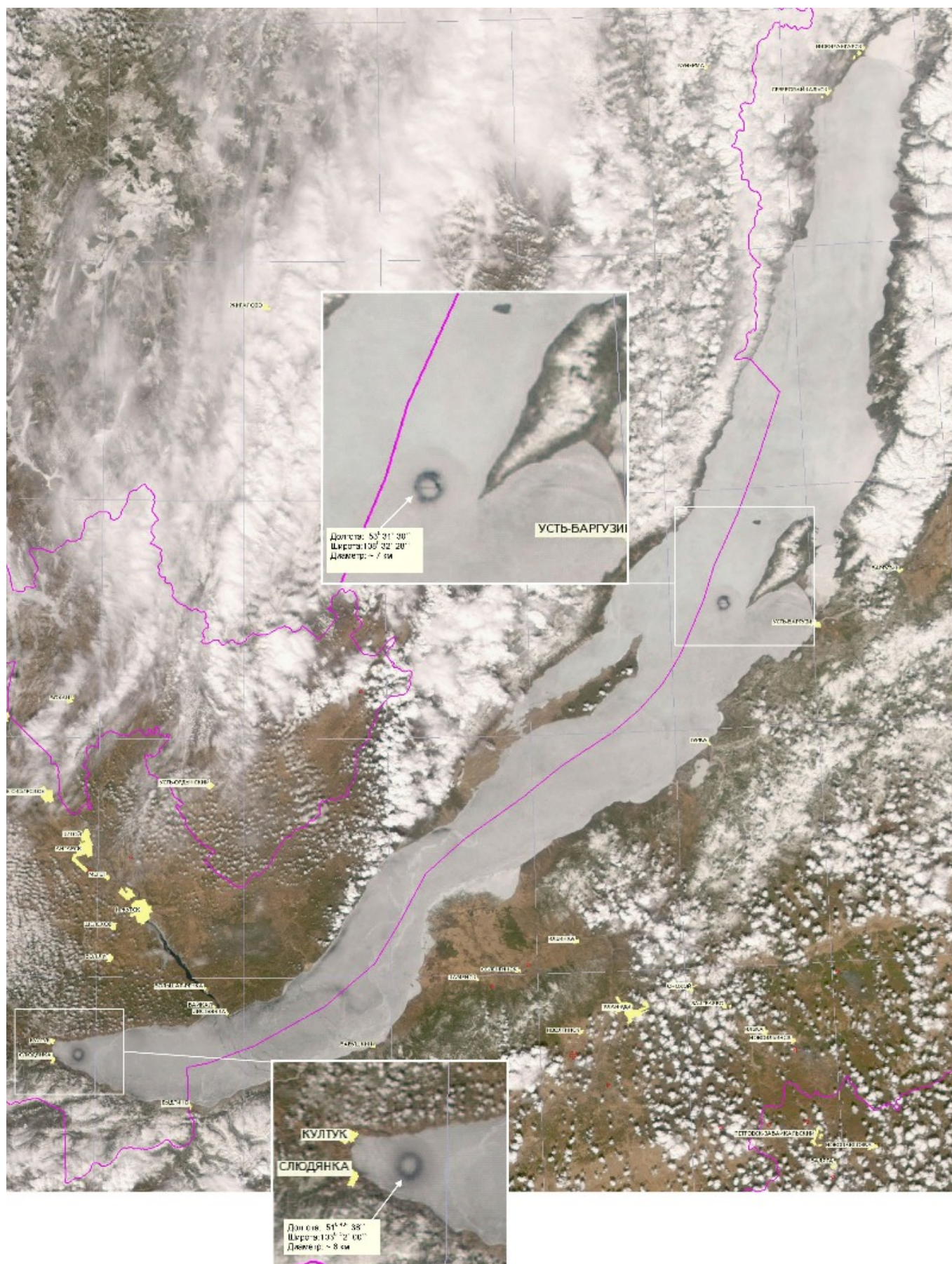


Рис. 2. Два кольца в районе Слюдянки и Святого Носа на космическом снимке.

Fig. 2. In the space image, two ring-shaped structures are visible in the Slyudyanka and Svyatoi Nos regions.

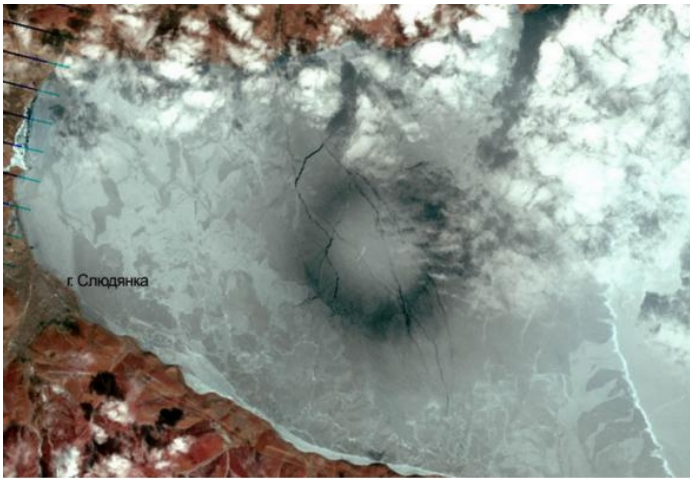


Рис. 3. На космическом снимке кольцевая структура, пересечённая трещинами и пропитанная по краям водой.

Fig. 3. The space image shows a ring-shaped structure cut by fractures; its edges are saturated with water.

переноса в вязких средах, разработанной автором, которая в векторной форме, в терминах функции тока, температуры и концентрации выглядит так:

$$\Delta\Psi = k\nabla\rho, \quad V = \text{rot}\Psi, \quad dT/dt = \delta\Delta T + M, \\ dC_i/dt = \lambda\Delta C_i + N_i, \quad \mu = \mu(T, C), \quad \rho = \rho(T, C), \quad k = g\rho/\mu, \quad (1)$$

где Ψ – векторная функция тока; ρ – плотность среды; V – вектор скорости конвекции среды; T – температура среды; C_i – концентрация i -го вещества; M – источник-сток тепла; N_i – источник-сток i -го вещества; μ – динамическая вязкость; k, δ, λ – коэффициенты текучести, температуропроводности, диффузии; Δ – оператор Лапласа, ∇ – оператор Гамильтона («набла»), $d/dt = \partial/\partial t + u\partial/\partial x + v\partial/\partial y + w\partial/\partial z$ – оператор полной производной; u, v, w , – проекции вектора скорости конвекции на координатные оси x, y, z ; $\text{rot}\Psi = (\partial\Psi_z/\partial y - \partial\Psi_y/\partial z) + (\partial\Psi_x/\partial z - \partial\Psi_z/\partial x) + (\partial\Psi_y/\partial x - \partial\Psi_x/\partial y)$ – оператор ротации (вихрь). На основе данной модели, с использованием конечно-разностных схем, разработан пакет программ на языке Fortran для персональных компьютеров, позволяющий решать широкий круг задач тепломассопереноса в вязких средах. Более подробно с этой моделью можно ознакомиться в работе [Gunin, 2011].

Для расчета задачи по формированию кольцевых структур на льду озера Байкал была взята трехмерная область с декартовой системой координат в виде параллелепипеда размером от 4000×4000 до 10200×10200 м, высотой 500–1500 м и разбита сеткой с шагом от 1 до 200 м на $(\Delta x=41) \times (\Delta y=41) \times (\Delta z=46)$ объемных ячеек. Расчеты проводились на время $t = 1$ –3 месяца с шагом по времени $\tau = 3.6$ –3600 с. Считалось, что в начальный момент времени $t=0$ ледяной покров и вертикальная

стратификация водной толщи уже были сформированы. В начальных условиях задавалось распределение температуры в двух верхних точках $T_l = -1$ °С, -0.5 °С для льда и остальные с распределением температуры $T_w = 0$ –4 °С для воды. На верхней и нижней границах области задавались постоянные значения температуры и условия непротекания, на боковых – условия протекания и распределения температуры (рис. 4).

Рассматривалось два варианта: модель с термальным источником и модель с газовойодяным источником. Вязкость среды в модели с термальным источником была постоянной (для воды $\mu = 1 \times 10^{-3}$ Па·с, для льда $\mu = 1 \times 10^{12}$ Па·с), а в модели с газовойодяным источником зависела от концентрации газа в воде (вязкость метана $\mu = 1 \times 10^{-5}$ Па·с). Коэффициенты температуропроводности для воды и льда принимались $\delta_w = 1.6 \times 10^{-7}$, $\delta_l = 1 \times 10^{-6}$ м²/с соответственно, для газа $\delta_g = 2 \times 10^{-5}$ м²/с. Коэффициенты диффузии для всей области брались одинаковые: $\lambda = 1 \times 10^{-8}$ м²/с, а коэффициент температурного расширения воды $\alpha = 2 \times 10^{-4}$ °С⁻¹.

Отклонение плотности (плавучесть) определялось в приближении Буассинеска $\rho(z) = \rho_0(z) \times (1 + \alpha(T_0 - T) - \beta C_g)$, где β – переводной коэффициент от концентрации газа к плотности газовойодяной эмульсии $\beta = 9.99$; α – коэффициент температурного расширения; T_0, T, C_g – исходные и текущие значения температуры и концентрация газа в рассматриваемой точке; $\rho_0(z)$ – плотность среды на определенной глубине. Так как для воды плотность имеет температурный максимум, то в процессе расчета для каждого момента времени и в каждой точке она определялась в зависимости от температуры в данной точке с помощью рассчитанных табличных значений. На дне в ограниченной области с помощью дельта-функции задавался термальный ис-

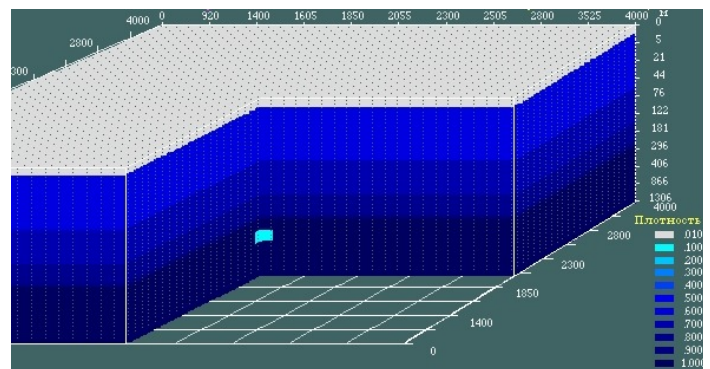


Рис. 4. Распределение плотности воды в рассматриваемой области и источнике в начальный момент времени (белым цветом отрисован слой льда).

Fig. 4. Water density patterns for the area under study and the source at the initial time point (the ice cover is shown in white).

точник с температурой $T_0=10-50$ °С или источник газовой эмульсии с концентрацией (объемной долей) газа $C_g=5-50$ % (газ метан плотностью $\rho_g=0.72$ кг/м³). При этом отношение между плотностью газовой эмульсии и плотностью воды ($\rho_v=1000$ кг/м³) составляло от 0.95 до 0.5, а площадь источника была равной 25×25 м², со временем существования от 10–60 минут для газовой эмульсии до 3 месяцев для термального.

Для оценки объемов и глубин расположения источников газа, формирующих выбросы в атмосферу или участки воды с кипящей поверхностью, была проведена серия расчетов со свободной поверхностью озера, контактирующей с атмосферой. Все исходные данные были такими же, но с распределением температуры летнего периода, в верхней части озера максимум 8–10 °С с понижением по глубине до 4 °С. Расчетная область имела следующие размеры по горизонтали: от 7000×7000 до 18000×18000 м, высотой 100–1200 м и была разбита сеткой с шагом от 2 до 2000 м на $(\Delta x=41) \times (\Delta y=41) \times (\Delta z=46)$ объемных ячеек. Площадь источника составляла от 5×5 до 20×20 м², со временем существования 10–200 с. Расчеты проводились на время от минуты до нескольких часов с шагом $\tau=0.1-1.0$ с.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА. ФОРМИРОВАНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ СТРУКТУР

Результаты расчетов показали следующее. При наличии термального источника с температурой воды 10–50 °С, или источника газовой смеси с концентрацией газа 5–50 % над ним появляется область с пониженной плотностью, а для каждого координатного направления формируется гидродинамический диполь и стратификация становится неустойчивой (ее еще называют неустойчивость Рэля-Тейлора). За счет горизонтального градиента плотности возникают выталкивающие силы, а за счет вертикального градиента плотности – тангенциальные силы, которые в горизонтальном сечении закручивают верхнюю часть области против часовой стрелки (циклонический вихрь), а нижнюю – по часовой стрелке (антициклонический вихрь). Легкая область всплывает, формируя восходящий конвективный поток (струи) торообразного вида. Этот конвективный поток захватывает окружающие его массы воды, поднимая их к поверхности. Скорость подъема потока зависит от его плавучести (температуры гидротерм или концентрации газа в источнике) (рис. 5).

Для сценария с источником гидротерм восходящая (центральная) часть потока, более прогретая и менее плотная, имела температуру источника на протяжении всего времени его работы. Нисходящая (периферийная) часть потока имела пониженную температуру и

повышенную плотность. При температуре гидротерм 10 °С, средняя скорость подъема составляла 0.2 см/с, при температуре 25 °С – 2 см/с, а при температуре 50 °С – 10 см/с.

Через 2–120 часов, в зависимости от плавучести (плотности), передняя часть потока, размером до 300–500 м, достигала ледяного покрова, вязкость которого на 12 порядков больше, чем у воды, растекалась по его подошве, формируя линзу с повышенной температурой. В центральной части линзы поток вращался против часовой стрелки (циклонический вихрь), а на периферии, где температура воды близка к температуре максимума ее плотности и шло ее погружение, по часовой стрелке (антициклонический вихрь). Постепенно размер линзы увеличивался пропорционально исходной температуре источника (рис. 6).

Максимальная температура воды, выносимая потоком к подошве льда, достигала температуры источника в его центральной части с постепенным понижением к периферии до температуры окружающих масс воды. Такая зональность температуры в восходящем потоке и сформированной линзе сохранялась до момента времени прекращения работы источника. Скорости потока на периферии при его вращении по часовой стрелке составляли от 1.5 см/с ($T_0=15$ °С) до 10 см/с ($T_0=50$ °С) (рис. 7).

После формирования линзы, если источник продолжал работу, за счет высокого градиента температуры между водой линзы и льдом постепенно шел его прогрев. Если температура гидротерм превышала 25 °С, то лед начинал частично разрушаться на куски разного размера, которые затем таяли, образуя участки свободной воды. Через некоторое время (часы, сутки), в зависимости от температуры источника, лед над линзой полностью таял и образовывалась пропарина, меньшего размера, чем линза (рис. 8).

После прекращения работы источника в центральную часть линзы по инерции начинала поступать глубинная холодная вода с повышенной плотностью, а периферийная часть линзы оказывалась более прогретой и менее плотной. Происходила реверсия, и центральная часть начинала тонуть (погружаться), восходящий поток (циклонический вихрь) менялся на нисходящий (антициклонический вихрь), увлекая за собой теплые воды с периферии линзы. Через 100–200 часов с обратной зависимостью от температуры воды в линзе (градиента плотности) исходное распределение температуры (плотности) восстанавливалось до заданного в начальных условиях (рис. 9).

Для сценария с газовой эмульсией картина такая же, но температура восходящего потока равнялась температуре воды, окружающей источник (4 °С). За счет низкой плотности газовой эмульсии подъем воды максимальной плотности шел с большей скоростью, чем подъем гидротерм. При концентрации газа 50 % время подъема струи составляло 4 мин, а при

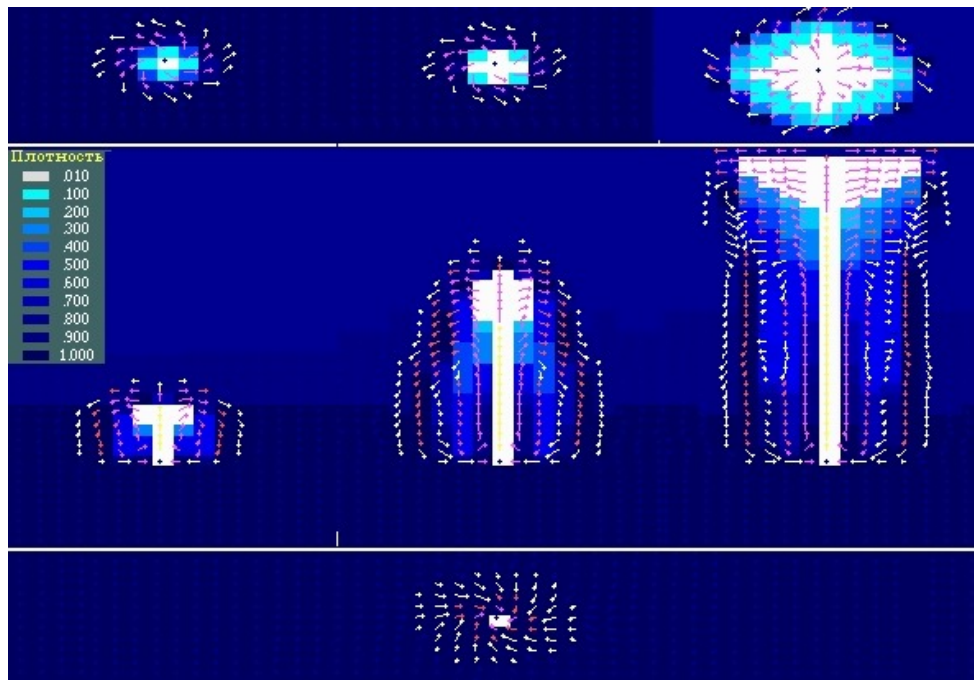


Рис. 5. Распределение плотности и поля скоростей при подъеме конвективного потока (струи) для трех моментов времени. В верхней и нижней частях рисунка показаны горизонтальные срезы в головной и подошвенной частях струи. Максимальная скорость потока – желтый цвет в центре струи, минимальная – белый цвет на периферии.

Fig. 5. Patterns of density and convection velocity field during ascending of the convection flow at three time points. The upper and lower segments of the figure show horizontal cross-sections in the head and bottom parts of the convection flow. Flow velocity: maximum – yellow (in the centre of the flow), minimum – white (at the periphery).

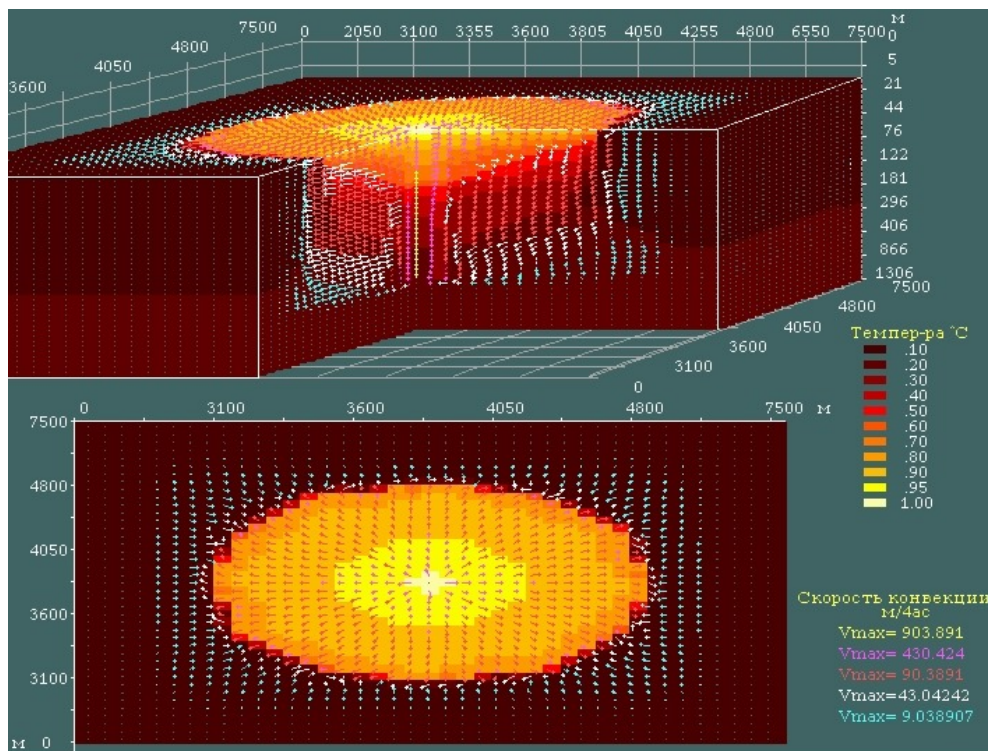


Рис. 6. Распределение температуры и поля скоростей конвекции при образовании линзы у подошвы ледяного покрова.

Fig. 6. Patterns of temperature and convection velocity field during formation of the lens at the bottom of the ice cover.

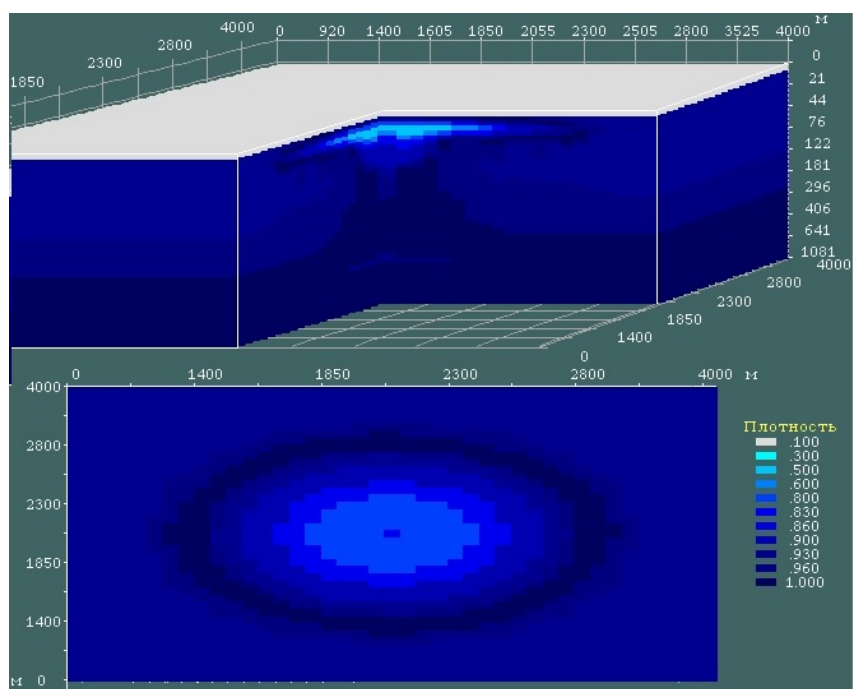


Рис. 7. Распределение плотности воды после образования линзы у подошвы ледяного покрова.

Fig. 7. The water density pattern after formation of the lens at the bottom of the ice cover.

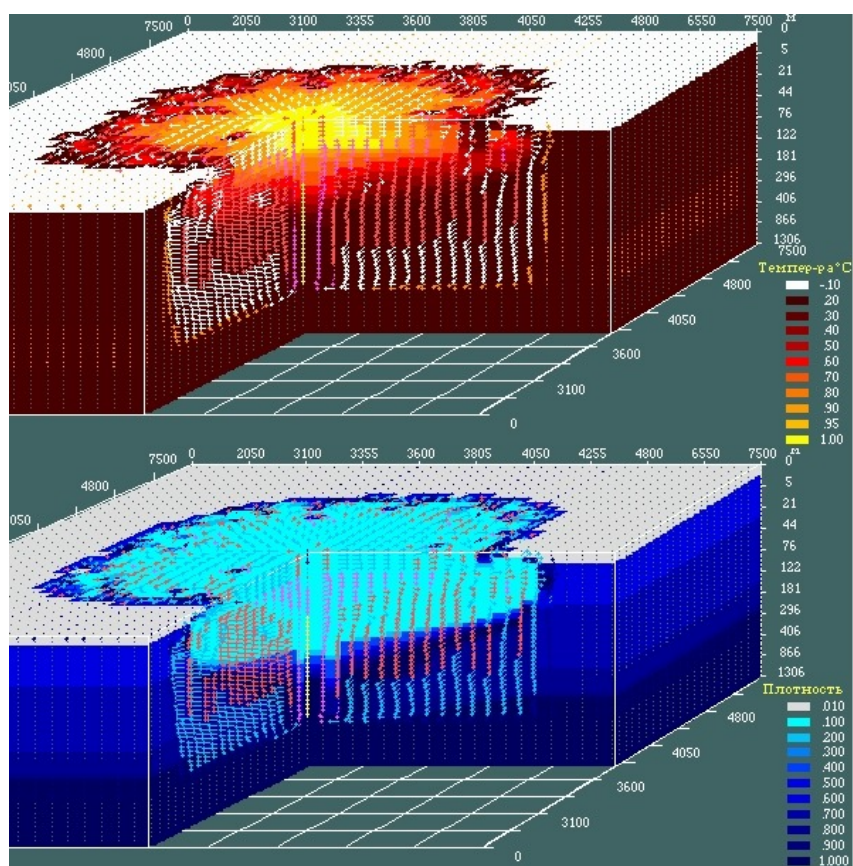


Рис. 8. Распределение температуры, плотности воды и поля скоростей конвекции после образования пропарины в ледяном покрове (белым цветом отрисован лед).

Fig. 8. Patterns of temperature, water density and convection velocity field after formation of an ice-melted spot in the ice cover (white).

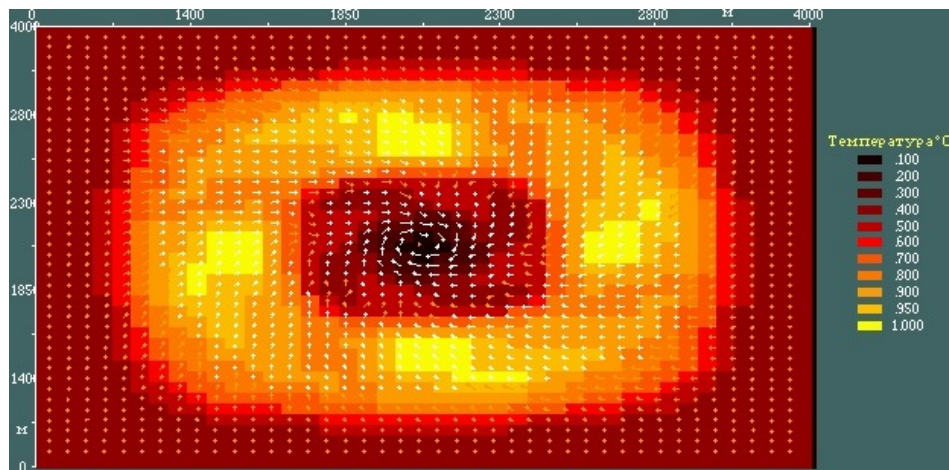


Рис. 9. Распределение температуры и поля скоростей конвекции при погружении линзы воды после прекращения работы гидротермального источника.

Fig. 9. Patterns of temperature and convection velocity field during submergence of the water lens after close-down of the hydrothermal vent.

концентрации газа 5 % – 20 минут, при этом окончательные размеры линз были в 2–3 раза больше, чем размеры линз от гидротермальных источников. Максимальная температура воды, выносимая потоком к подошве льда, достигала 4 °С, а значит, и максимальной плотности в его центральной части, с небольшим понижением к периферии (рис. 10).

Во время формирования линзы и после его прекращения, но при условии, что концентрации газа было достаточно для повышенной плавучести, вращение потока в ее центре было циклоническое, а на периферии антициклоническое с максимальной скоростью до 50 см/с. После прекращения работы источника поток по инерции продолжал подъем. Как только концентрация газа снижалась до величины, при которой плавучесть зависела только от температуры, линза начинала погружаться за счет повышенной плотности ($T=4\text{ °C}$) относительно окружающих ее вод. Погружение шло неравномерно, центральная, более плотная, часть линзы погружалась быстрее, чем периферийная (рис. 11).

Известно, что на таяние льда и образование полыньи оказывают влияние не только термические, но и гидродинамические условия [Mishon, 1983]. Ориентировочные критические скорости, при которых возможно образование полыньи в реках, рассчитываются по специальной формуле, имеющей несколько параметров, их значения достигают 2.5–3.0 м/с. Для глубоких озер эти параметры, скорее всего, другие и для каждого случая их надо определять экспериментально. В любом случае влияние гидродинамической составляющей на таяние льда должно быть существенным. Вращение воды на периферии линзы с рассчитанными в данном эксперименте скоростями может приводить к частичному разрушению льда, пропитыванию его водой и появлению на поверхности льда темных колец.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА. ВЫБРОС ГАЗА В АТМОСФЕРУ

Результаты расчетов показали, что для того чтобы произошел выброс газа в атмосферу, время работы источника должно быть не менее времени подъема (добегания) струи газа до раздела вода – воздух. Скорость подъема струи зависела от концентрации газа и объема (площади) источника и составляла от 12 до 20 м/с. Значит, чем глубже расположен источник газа, тем больше времени он должен быть активным. Так, для глубины 1200 м и концентрации газа 100 % (чистый пузырь газа без воды) время работы источника должно быть не менее 1.5 минуты. Скорость движения газа в разных частях струи разная. В головной части, где шло расхождение потока с вращением в центральной части против часовой стрелки для преодоления сопротивления воды, скорость наименьшая – 10–12 м/с, а в нижней и центральной частях струи могла достигать до 60–80 м/с (рис. 12). При выходе столба газовой смеси в атмосферу скорости вращения резко возрастали и могли достигать 150 м/с.

При концентрации газа 100 % и объеме выхода из источника $400000\text{ м}^3/\text{с}$ с глубины 250 м и времени работы 12 с высота выброса в воздух достигала 15 м, а при снижении концентрации высота выброса уменьшалась и при 30 % газа (смесь: вода + газ) достигала максимум 4 м. С уменьшением глубины расположения источника до 100 м время подъема (добегания) струи уменьшалось до 4 с, с высотой выброса 12 м и объемом источника до $30000\text{--}40000\text{ м}^3/\text{с}$. Для глубины 1200 м и максимальной высоты выброса газа 12 м объем источника должен быть равен $4000000\text{--}5000000\text{ м}^3/\text{с}$, а время его работы 90–100 с. С уменьшением концентрации газа в источнике до 30–25 % или с

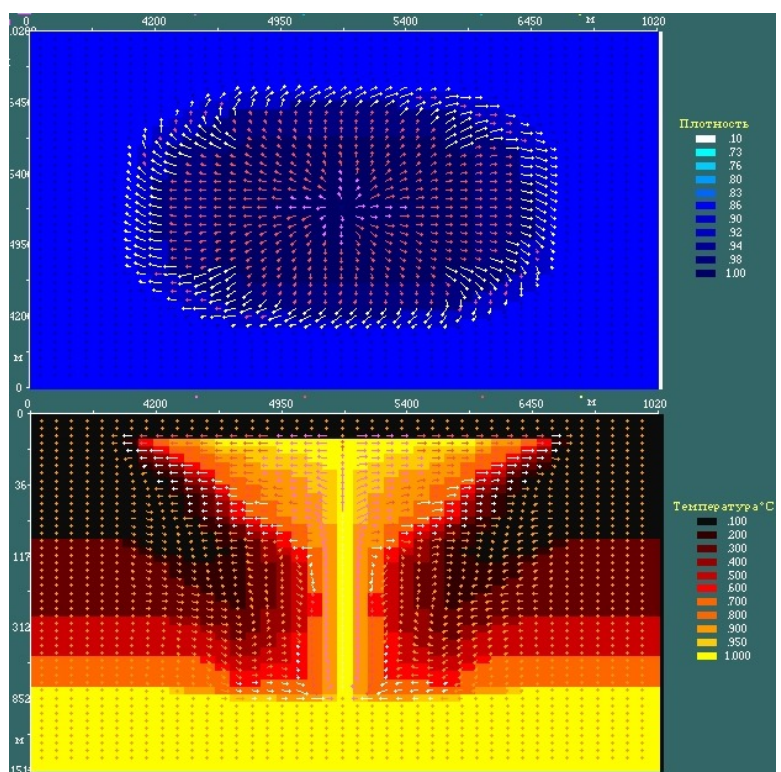


Рис. 10. Горизонтальный и вертикальный срезы с распределением температуры, плотности и поля скоростей конвекции (максимальная скорость – желтый цвет, минимальная – белый) после подъема и формирования линзы при работе газовой источника.

Fig. 10. Horizontal and vertical cross-sections and patterns of temperature, water density and convection velocity field after uplift and formation of the lens in the period when the gas-water source was active. Flow velocity: maximum – yellow; minimum – white.

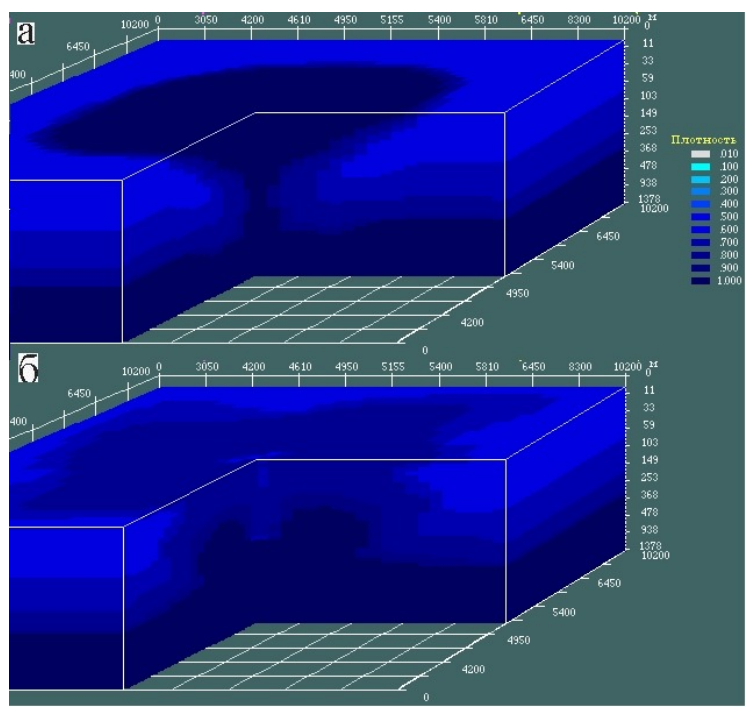


Рис. 11. Распределение плотности воды: а – перед погружением, б – при погружении линзы, сформированной газовой источником.

Fig. 11. Water density patterns: а – before submergence, б – during submergence of the lens produced by the gas-water source.

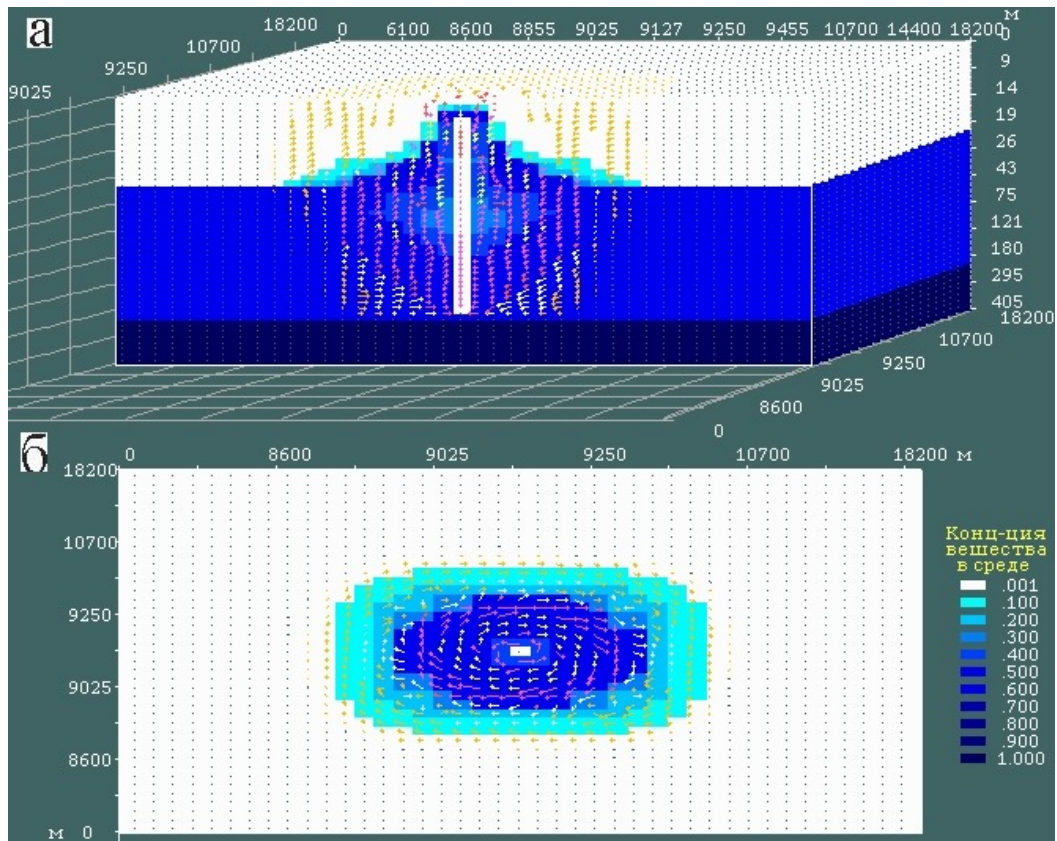


Рис. 12. Распределение концентрации вещества и поля скоростей конвекции при выходе столба газовой смеси в атмосферу: *а* – вертикальный срез в центральной части блока; *б* – горизонтальный срез над поверхностью воды. Максимальная скорость – желтый цвет, минимальная скорость светло-коричневый цвет на периферии.

Fig. 12. Patterns of concentration of the material and convection velocity field when the gas-and-water mix is emitted as a pillar into the atmosphere: *a* – vertical cross-section in the central part of the block; *b* – horizontal cross-section above the water surface. Flow velocity: maximum – yellow, minimum – light brown (at the periphery).

уменьшением объема выхода из источника примерно в 3–4 раза высота выброса уменьшалась пропорционально до 3–4 м (рис. 13).

После обрушения столба газовой смеси формировалась расходящаяся на сотни метров кольцевая волна высотой 2–4 м. Волнение водной поверхности могло продолжаться до нескольких часов. Если источник газа работал больше времени подъема (добегания) струй до раздела вода – воздух, то после первого выброса в атмосферу шел следующий выброс, т.е. формировался колебательный процесс с неравномерными периодами времени между выбросами и разной амплитудой (высотой выброса). При меньших концентрациях газа в источнике – 1–10 % объема (газовая смесь), но длительной работе источника на поверхности озера формировались области с выделением газа в виде пузырьков (грифоны) (рис. 14).

Скорость подъема газового пузыря (концентрация газа 100 %) уменьшалась с увеличением его размеров. Так, для глубины 1200 м с объемом в источнике $4000000 \text{ м}^3/\text{с}$ время подъема составляло 90 с, а с объемом $10000000 \text{ м}^3/\text{с}$ – в 2.5 раза больше – 230 с. С глу-

бин 100–200 м скорость подъема пузыря также уменьшалась при увеличении его объема, выделяемого источником. Это, скорее всего, можно объяснить повышением сопротивления при подъеме пузыря за счет увеличения площади его поверхности.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов показал следующее. При наличии термального или газовой источника над ним возникает область с пониженной плотностью и формируется восходящий конвективный поток (струя) торообразного вида. За счет горизонтального градиента плотности возникают выталкивающие силы, а за счет вертикального градиента плотности – тангенциальные силы, которые в горизонтальном сечении закручивают верхнюю часть области против часовой (циклонический вихрь), а нижнюю – по часовой стрелке (антициклонический вихрь).

Во время работы гидротермального источника у

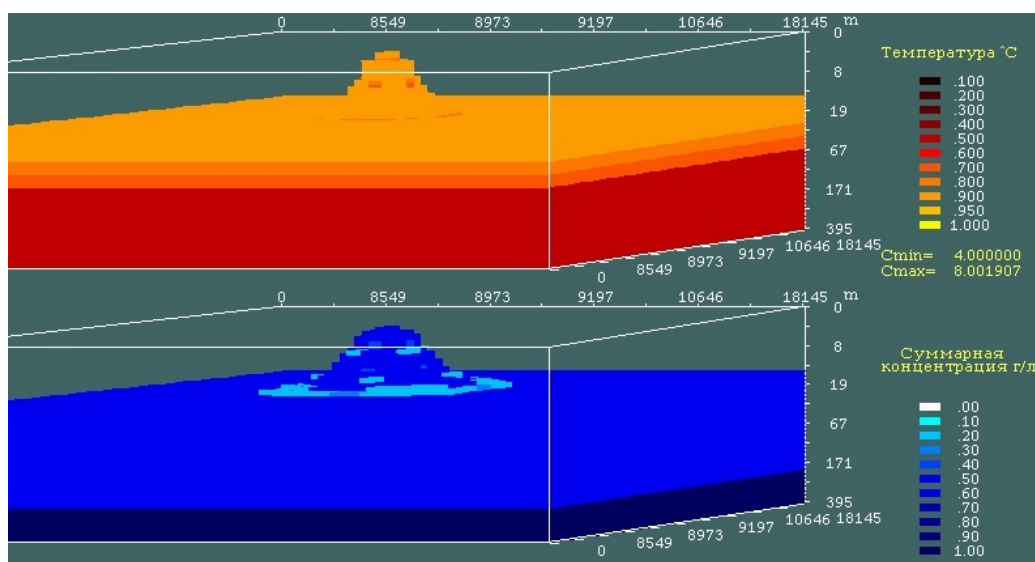


Рис. 13. Распределение температуры и концентрации вещества в столбе выброса газовой смеси в атмосферу.

Fig. 13. Patterns of temperature and concentration of the material in the gas-and-water pillar in the atmosphere.

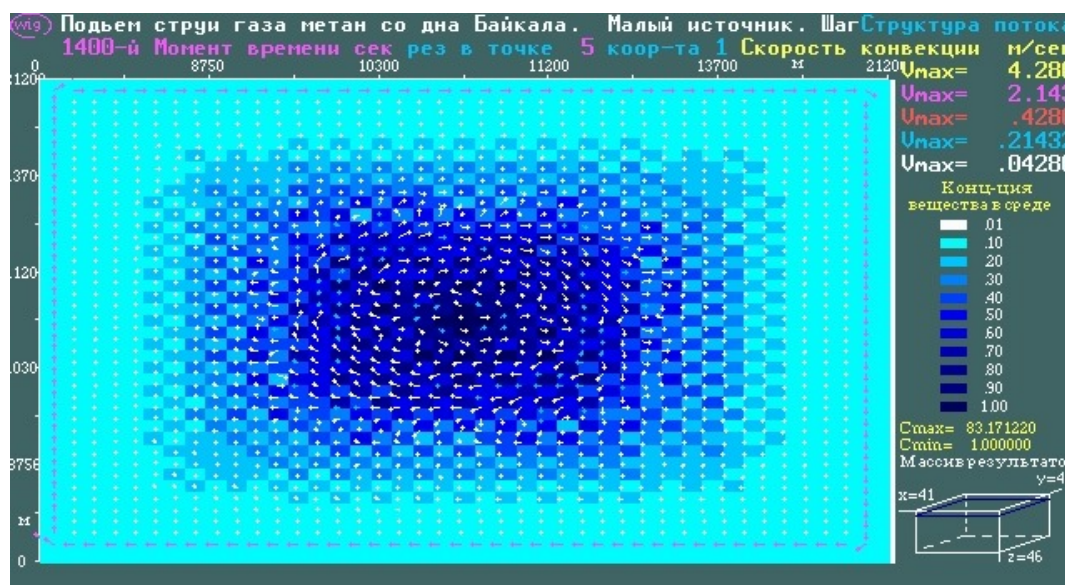


Рис.14. Распределение пузырьков газа и воды на поверхности акватории при малых объемах газа в источнике.

Fig. 14. Patterns of gas bubbles and water at the water surface in case of small volumes of gas in the source.

подошвы ледяного покрова через 2–120 часов, в зависимости от плавучести (плотности), образуется линза с повышенной температурой и вихревыми течениями, сформированными при подъеме струи. При температуре гидротерм $T=30-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ во льду может образоваться пропарина.

Для газовой эмульсии картина такая же, но линза начинает формироваться через гораздо меньшее время, от 1–5 мин (концентрации газа 100–50 %) до 20 мин (концентрации газа 5 %) от момента времени начала его работы, и размер линзы гораздо больше.

Температура газовой эмульсии в центральной части линзы достигает $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а значит, и максимальной плотности, с небольшим ее понижением к периферии. После снижения концентрации газа в линзе до величины, при которой плавучесть зависит только от температуры, стратификация становится неустойчивой и линза начинает погружаться, вращаясь по часовой стрелке.

Полученные в численном эксперименте значения скоростей вращения потока на периферии линзы позволяют предположить, что лед в этом месте будет ча-

стично разрушаться, пропитываться водой с появлением на его поверхности темных колец. После получения параметров, влияющих на разрушение льда, можно будет более детально рассчитать появление кольцевых структур.

Для формирования выброса газа в атмосферу время работы источника должно быть не менее времени подъема (добегания) струи газа до раздела вода – воз-

дух при скорости движения от 12 до 20 м/с. Высота выброса пропорциональна количеству газа в пузырьке и может достигать 15 м при концентрации газа 100 % (чистый пузырь газа без воды). При концентрациях газа в источнике 1–20 % от объема (газоводяная смесь) и длительной работе источника на поверхности озера могут формироваться области с выделением газа в виде пузырьков (грифоны).

6. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Bulletin of the Irkutsk Scientific Centre, Siberian Branch of RAS*, 2011 (71), February 2011 (in Russian) [*Вестник Иркутского научного центра СО РАН*, выпуск № 71, февраль 2011].
- Granin N.G., Granina L.Z., 2002. Gas hydrates and gas emissions at Lake Baikal. *Geology and Geophysics* 43 (7), 629–637 (in Russian) [Гранин Н.Г., Гранина Л.З. Газовые гидраты и выходы газов на Байкале // *Геология и геофизика*. 2002. Т. 43. № 7. С. 629–637].
- Gunin V.I., 2011. New information technology and its capacities for modeling of geosystems. *Geodynamics & Tectonophysics* 2 (4), 356–377. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2011-2-4-0050>.
- Mishon V.M., 1983. Applied Hydrophysics. Hydrometeoizdat, Leningrad, 173 p. (in Russian) [Мишон В.М. Практическая гидрофизика. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 173 с.].
- Petrov E., 2011. The dark rings. *The World of Baikal* (5), 64–66 (in Russian) [Петров Е. Темные кольца // *Мир Байкала*. 2011. № 5 (29). С. 64–66].
- Radziminovich Ya.B., Shchetnikov A.A., 2008. Mass emissions of methane at Baikal? *Priroda* (11), 45–48 (in Russian) [Радзиминович Я.Б., Щетников А.А. Массовые выбросы метана на Байкале? // *Природа*. 2008. № 11. С. 45–48].



Гунин Владимир Иванович, директор
Независимый коммерческий центр моделирования геосистем «МоГеос»
670034, Улан-Удэ, пр. 50 лет Октября, 38–18, Россия
✉ e-mail: vigunin@list.ru

Gunin, Vladimir I., Director
MoGeos Independent Commercial Centre for Modeling of Geological Systems
38–18 50 let Oktyabrya, Ulan-Ude 670034, Russia
✉ e-mail: vigunin@list.ru