

ЛИТЕРАТУРА

1. Берсенева И.И., Леликов Е.П., Безверхний В.Л. и др. Геология дна Японского моря. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1987. 140 с.
2. Долгих Г.И., Карнаух В.Н., Самченко А.Н., Бордиян О.В. Исследование осадков прибрежной зоны и разработка геоакустической модели (залив Посьета, Японское море) // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря. М.: ГЕОС, 2008. С. 379–384
3. Долгих Г.И., Лучин В.А., Ярошук И.О., Варлатый Е.П., Черанев М.Ю., Мартынов М.Ю., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырев А.Н. Экспериментальные исследования поля скорости звука на шельфе Японского моря // Шестой Всерос. симпоз. «Физика геосфер» 7–11 сент. 2009 г. Владивосток, ТОИ ДВО РАН: мат-лы докл. Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 37–41
4. Карнаухов А.А., Сергеев А.Ф. Структура и динамика вод залива Петра Великого летом // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря. М.: ГЕОС, 2008. С. 57–73.
5. Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г. Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997. 191 с.
6. Листровая И.А., Карнаух В.Н., Бордиян О.В. Сейсмические фации четвертичных осадков западной части залива Петра Великого (Японское море): результаты интерпретации данных 3,5 КГц профилографа // Океанологические исследования: тез. докл. конф. молодых ученых Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН. Владивосток. 19–23 мая 2008 г. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2008. С. 46 – 48.
7. Наумова В.В. и др. ГИС «Минеральные ресурсы, металлогенезис и тектоника северо-востока Азии» // Тихоок. геол. 2006. Т. 25, № 5. С. 8 – 21.
8. Петелин В.П. Гранулометрический анализ морских донных осадков. М.: Наука, 1967. 125 с.

УДК 550.4:553.98:552.578

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТАНА И РАСЧЕТ ЕГО ПОТОКОВ НА ГРАНИЦЕ ВОДА–АТМОСФЕРА НА АКВАТОРИИ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ В ТЕПЛЫЙ СЕЗОН

Г.И. Мишукова, Н.Л. Пестрикова,
В.Ф. Мишуков, О.С. Яновская

Тихоокеанский океанологический
институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН¹

В сентябре-октябре 2010 г. на акватории северо-западной части Японского моря наблюдались повышенные концентрации метана в поверхностных морских водах. Летние температуры воды и значительные скорости ветров вызвали интенсивное выделение метана в атмосферу из морской воды, причем в шельфовых районах потоки метана значительно выше, чем в мористой части акватории. Сравнение экспериментальных данных и результатов расчета переноса водных масс, содержащих растворенный метан, свидетельствует о том, что район эпицентра землетрясения может выступать в роли источника поступления метана в морскую среду.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на незначительное содержание метана в атмосфере он играет исключительно важную роль. Являясь одним из парниковых газов, метан способен участвовать в процессах формирования климатических условий всей нашей планеты. Кроме того, растворенный в воде метан часто используется в качестве индикатора для обнаружения мощных подземных источников углеводородов (нефтяных, угольных, газовых месторождений и залежей газогидратов). Поэтому изучение пространственного распределения метана в водной среде является важным для определения источников и механизмов, влияющих на содержание метана.

Как показали наши исследования [5], в Японском море,

как и в водах других морей, метан неоднородно распределен по глубине. В шельфовых районах залива Петра Великого происходит вынос метана из подземных источников в придонные воды. Метан в мелководных районах образует зоны повышенной концентрации в придонных слоях, которые за счет адвективного переноса водных масс обуславливают формирование слоя с повышенным содержанием метана в подповерхностных водах открытых районов моря вблизи побережья России [3, 5]. Низкая температура приповерхностного слоя воды в ноябре 1995 г. привела к насыщению в диапазоне 20–50% поверхностных вод метаном относительно его содержа-

¹ 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, тел.: (4232) 312617, e-mail: gmishukova@poi.dvo.ru

ния в атмосфере и обусловила поглощение метана из атмосферы для открытых районов Японского моря. Так как расчеты потоков метана были выполнены только для разреза Владивосток–Ниигата в ноябре 1995 г. [5], то необходимо было провести дополнительные исследования по распределению метана в морской воде и его потоков по современным данным.

Цель настоящей работы – изучение пространственного распределения содержания метана в морской воде и оценка его потоков на границе вода–атмосфера на акватории северо-западной части Японского моря в теплый сезон (сентябрь–октябрь 2010 г.) при расчете переноса метана водными массами на изучаемой акватории под влиянием гидрометеорологических условий с учетом сейсмической активности региона.

■ Объекты и методы исследования

Методика газогеохимических работ сводится к следующим операциям: отбор пробы воды, извлечение из нее газа, газохроматографический анализ и интерпретация данных [5].

Отбор проб морской воды осуществлялся на ходу судна и на станциях с помощью заборного устройства на глубине 4 м от поверхности моря, которая затем поступала в термосалинограф SBE 21SEACAT (USA, Washington) для непрерывного определения температуры и солености при параллельном отборе воды в емкости для проведения газохимического анализа.

Концентрация газов (преимущественно метана) в воде определялась методом равновесного парафазного анализа с последующим газохроматографическим анализом газовой фазы на борту судна. Проба воды отбиралась в ме-

дицинскую склянку объемом 275 мл «под горлышко с двойным переливом». Склянка закрывалась резиновой пробкой, проколота иглами двух шприцов для удаления воздуха и избытка воды. Одна игла затем подсоединялась к газовому мешку «Tedlar Bag Dual Valves» (США), наполненному гелием при атмосферном давлении. С помощью пустого шприца, отбирали 12 мл морской воды, на место которой поступал газ из мешка. Иглы удалялись, а склянки в течение двух часов термостатировались при комнатной температуре (20–23 °С) при периодическом встряхивании с помощью перемешивающего устройства LS-110, в результате чего в емкости устанавливалось равновесие между жидкой и газовой фазами. По истечении указанного времени шприцем отбиралась аликвота газовой фазы для последующего анализа.

Определение газовых компонентов проводилось на хроматографе «Кристалл-Люкс-4000 м» (производство Россия, г. Йошкар-Ола) после введения пробы газа в крандозатор. Модуль хроматографа имеет три детектора: два – по теплопроводности и один – пламенно-ионизационный, что дает возможность анализировать все основные газы в один прием. Пламенно-ионизационный детектор (ДИП) служит для качественного и количественного измерения концентрации метана и других органических компонентов с точностью 10⁻⁵%. Неорганические газы – азот, кислород, углекислый газ и метан с концентрацией более 1% – анализируются на детекторах по теплопроводности (ДТП), чувствительность которых составляет 0,01%.

Хроматографические условия анализа: газ-носитель – ге-

лий, расход – 20 мл/мин; две металлические колонки (NaX, внутренний диаметр 3 мм, длина – 1,5 м и HayeSep D, внутренний диаметр 3 мм, длина – 2 м), программирование температуры – от 50° со скоростью 10°/мин.

Для калибровки прибора применяются сертифицированные поверочные газовые смеси производства Германии с концентрациями метана 10, 100, 1000 ppm (ppm – part per million = 1×10⁻⁴%) и 1%. Погрешность измерений составляет 5%.

Для расчета растворенного в морской воде метана использовалось уравнение, приведенное в работе [10].

При анализе использовались материалы экспедиции НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (Комплексные геологические, геофизические, газогеохимические и гидрологические исследования в Японском море и Прикурильском районе Тихого океана: отчет о НИР в 52-м рейсе на НИС «Академик М.А. Лаврентьев», 17 сентября – 11 октября 2010 г. / ТОИ ДВО РАН; рук. Валитов М.Г.; исполн. Белоус О.В. [и др.]. – Владивосток, 2010. – 102 с.). По данным, полученным в результате экспедиционных работ, изучено пространственное распределение метана в приповерхностном слое воды в северо-западной части Японского моря (рис. 1) и оценен поток метана с поверхности моря в атмосферу в период исследований. На акватории Японского моря было выполнено 3 полигона: в районе возвышенности Витязь отобрано 143 пробы, горы Петра Великого – 20, в районе каньона Гамова – 8 проб.

Расчет потоков метана проводился по методологии, описанной в работе [5].

Данные о координатах, времени и магнитуде землетрясений в исследуемом районе были

взяты на сайте U.S. Geological Survey, National Earthquake Information Center. World Data Center for Seismology [11]. Рис. 1 построен с помощью программы Ocean Data View, авторы выражают благодарность разработчикам программы.

■ Результаты и обсуждение

Экспериментальные результаты

Для всего района работ в Японском море диапазон концентраций метана составил от 3 до 36 нмоль/л (среднее значение: 7 нмоль/л). При движении от г. Владивосток на восток вдоль южного побережья Приморского края отчетливо выделяется участок с повышенными концентрациями метана: от 10,2 до 36,3 нмоль/л (рис. 1). Далее по направлению на северо-восток на профиле м. Поворотный – прол. Лаперуза концентрации метана снижаются от 10,7 до 4,8 нмоль/л в центральных районах Японского моря, а затем медленно возрастают до 11–13 нмоль/л на входе в прол. Лаперуза.

При обратном движении из Охотского моря на акватории

Японского моря был выполнен полигон в районе возвышенности Витязь (рис. 1). Здесь распределение метана носит явно не однородный характер, обусловленный, по-видимому, наличием подводных источников метана. На полигоне зарегистрированы концентрации метана от 3,4 до 7,6 нмоль/л (среднее значение: 5,6 нмоль/л). Сравнение полученных данных позволяет выделить область пониженных концентраций метана преимущественно в северной части полигона и область повышенных концентраций метана в южной части относительно северной.

Далее при движении по маршруту от возвышенности Витязя до южного района, расположенного в мористой части залива Петра Великого Японского моря, зарегистрированы сравнительно низкие концентрации метана – от 3 до 5 нмоль/л (рис. 1). На полигоне в Японском море в районе горы Петра Великого концентрации метана изменялись в диапазоне от 4,1 до 8 нмоль/л, (среднее значение: 6 нмоль/л), а в пределах каньона Гамова – от 4,5 до 5,1 нмоль/л (среднее значение: 5 нмоль/л) (рис. 1).

Ранее, во время проведения экспедиционных работ в прибрежной зоне [3, 5] в Хасанском районе Приморского края, включая залив Посыета, было показано, что после сильного землетрясения наблюдалось резкое возрастание концентрации метана сначала в подземных водах, а затем в поверхностных пресных и морских водах, достигая максимальных значений. Через 2–3 года концентрации метана снижаются до первоначальных значений. Поэтому для объяснения неоднородных концентраций метана на акватории Японского моря были привлечены данные об эпицентрах и магнитудах землетрясений в исследованном районе в 2008–2010 гг. (рис. 2–4). По-видимому, проявление в течение рассматриваемого периода нескольких землетрясений обусловило повышенные концентрации метана в воде залива Петра Великого по сравнению с результатами 1996 г. [5], причем прослеживается возрастание концентрации метана в областях, наиболее тесно прилегающих к районам землетрясений (рис. 2–4).

Расчет распределения растворенного метана на акватории

Известно, что после выделения метана в морскую среду происходит его перенос от источника на значительные расстояния на акваториях Японского и Охотского морей [3, 4]. Для исследования пространственного переноса метана была использована модель расчета полей течений и распределения примеси на акватории залива Петра Великого [2].

Предполагается, что перенос и трансформация примеси в морских условиях зависят от нескольких динамических факторов, таких как скорость и направление ветровых течений,

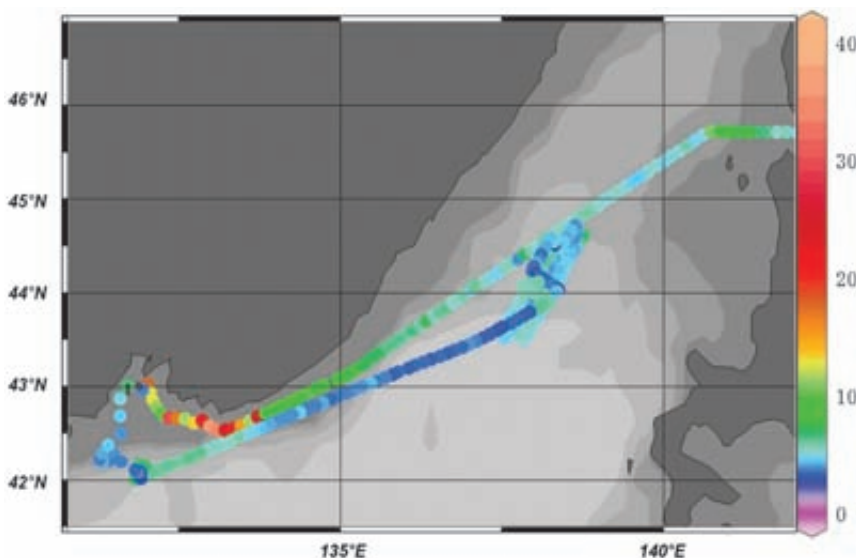


Рис. 1. Распределение метана (нмоль/л) в поверхностном 4-метровом слое морской воды в северо-западной части Японского моря (сентябрь-октябрь 2010 г.)

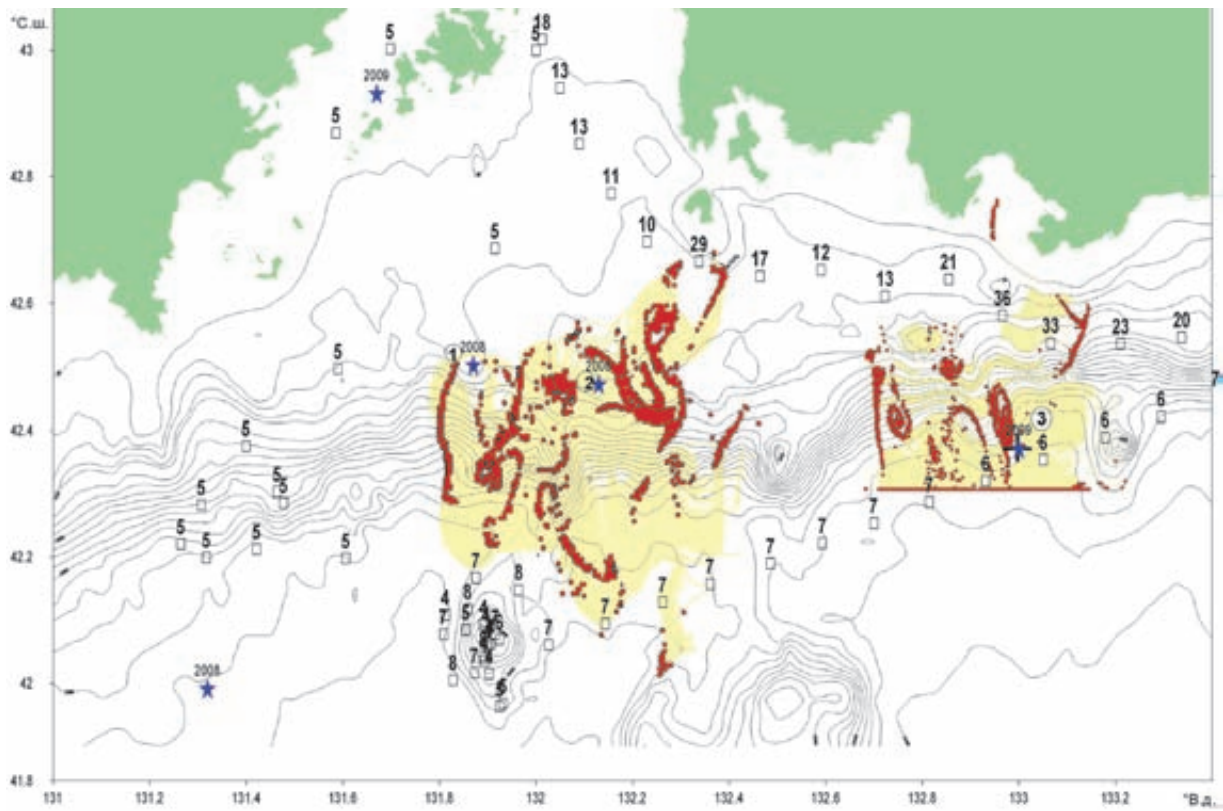


Рис. 2. Моделирование полей переноса метана на акватории залива Петра Великого в поверхностном 4-метровом слое морских вод на период 17–18.09.2010

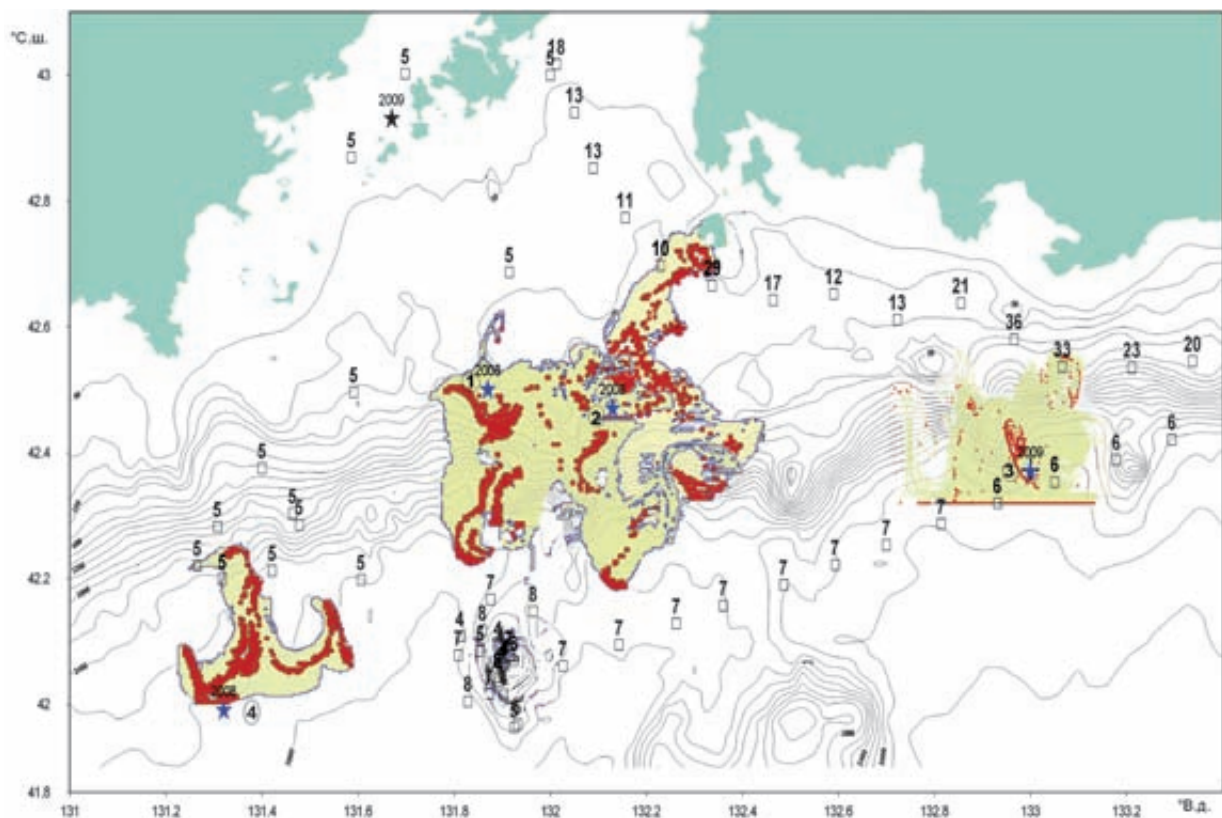


Рис. 3. Моделирование полей переноса метана на акватории залива Петра Великого в поверхностном 4-метровом слое морских вод на период 9–10.10.2010

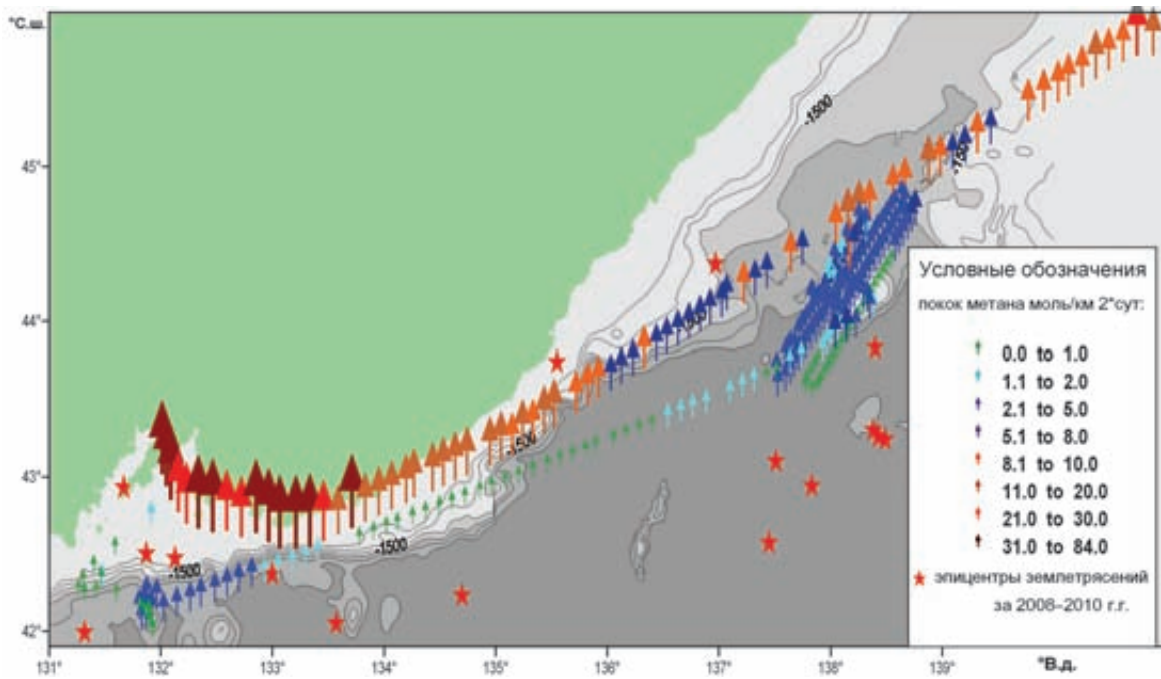


Рис. 4. Распределение потоков CH_4 (моль/км²·сут) на границе вода–атмосфера на акватории Японского моря (сентябрь–октябрь 2010 г.). Звездочки – район эпицентров землетрясений, зарегистрированных в 2008–2010 гг.

приливных и остаточных течений, турбулентной диффузии. Вектор перемещения пятна примеси на поверхности моря за временной шаг моделирования dt можно представить в виде суперпозиции векторов воздействия каждого фактора. Тогда уравнение движения пятна можно записать в декартовой системе координат x, y в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= k_{c-o} \{u_w(x, y, t) + u_i(x, y, t) + \\ &+ u_d(x, y, t)\} + k_{w-o} w_x(x, y, t) \\ \frac{dy}{dt} &= k_{c-o} \{v_w(x, y, t) + v_i(x, y, t) + \\ &+ v_d(x, y, t)\} + \\ &+ k_{w-o} w_y(x, y, t), \end{aligned} \quad (1)$$

где: u_w, v_w – осредненные по глубине компоненты скорости ветрового течения слоя воды, u_i, v_i – компоненты суммарной скорости двух главных приливных волн, u_d, v_d – соответствующие турбулентные добавки, w_x, w_y – скорость ветра, k_{c-o} ,

k_{w-o} – коэффициенты воздействия подстилающих течений и приводного ветра на дрейф примеси.

Экспериментальные данные о течениях были получены в 1978–1980 гг. и охватывают всю северную и частично южную часть Амурского залива. Схема постановки буйковых станций приведена в работе [8]. В общей сложности было обработано около 60 буйковых станций с длительностью постановки 4–7 суток.

Для получения характеристик приливных течений был использован статистический метод выделения циклических трендов с некратными частотами Андерсона [1]. Перед началом гармонического анализа экспериментальные ряды течений подвергались низкочастотной фильтрации Бартлета для подавления высокочастотной части спектра течений [6]. Погрешность выделения гармонических постоянных не превышает 5% [6]. В расчетах использовали две наиболее мощные гармоники суточной и

полусуточной группы волн – O_1 и M_2 . Конечным результатом процесса гармонического анализа является получение амплитуд F выбранных гармоник и их фаз φ на момент проведения эксперимента при последующем расчете этих величин на любой заданный момент времени.

При этом составляющие скорости приливного течения для двух основных приливных волн $u_i(l, t_n)$ и $v_i(l, t_n)$ восстанавливаются для момента времени t_n и точки пространства $l(x(t_n), y(t_n))$ по амплитуде F_i и фазе φ_i , рассчитанным по экспериментальным данным по формулам:

$$\begin{aligned} u_i(l, t_n) &= \sum_{i=1}^2 F_i^u(l) \cos \left\{ \frac{2\pi t_n}{T_i} + \varphi_i^u(l, t_0) \right\} \\ v_i(l, t_n) &= \sum_{i=1}^2 F_i^v(l) \cos \left\{ \frac{2\pi t_n}{T_i} + \varphi_i^v(l, t_0) \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

где T_i – период гармоник.

При анализе экспериментальных наблюдений за течениями после вычитания двух приливных гармоник в ряду

оставались гармонические составляющие с периодами остальных приливных волн, инерционных колебаний и комбинационных приливных мод. Корреляционный анализ показал, что эти гармонические процессы вносят свой вклад в остаточные пульсационные турбулентные составляющие u_d , v_d и могут быть учтены процессом авторегрессии второго порядка в виде:

$$\begin{aligned} u_d(l, t_n) &= -\sum_{k=1}^2 a_k(l) u_d(l, t_{n-k}) + \alpha(l), \\ v_d(l, t_n) &= -\sum_{k=1}^2 b_k(l) v_d(l, t_{n-k}) + \beta(l), \end{aligned} \quad (3)$$

где $a_k(l)$, $b_k(l)$ – коэффициенты авторегрессии, $\alpha(l)$, $\beta(l)$ – случайные нормально распределенные числа с нулевым средним и дисперсиями σ_u^2, σ_v^2 соответственно.

Для расчета полей суммарных течений была использована программа численного решения уравнения полных потоков Фельзенбаума для мелкого моря [7]. Задача была решена методом «бегущего счета» на аппроксимирующей залив Петра Великого сетке (размер ячейки 0,5·0,5 км²). На твердых границах расчетной области нормальная к берегу составляющая функции полных потоков приравнивалась к нулю, на жидких границах задавалось условие «полного протекания». В схеме решения учтен сток р. Раздольная.

Поскольку в модели используются стационарные поля скорости ветрового течения, то с целью сглаживания скорости в момент смены ветра компоненты скорости для момента t_n рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} u_w &= \frac{u_w(l, t_n) + u_w(l, t_{n+1})}{2}, \\ v_w &= \frac{v_w(l, t_n) + v_w(l, t_{n+1})}{2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Аналогичную процедуру применяем к составляющим приливных течений:

$$\begin{aligned} u_t &= \frac{u_t(l, t_n) + u_t(l, t_{n+1})}{2}, \\ v_t &= \frac{v_t(l, t_n) + v_t(l, t_{n+1})}{2}. \end{aligned} \quad (5)$$

В программу вводятся: количество и координаты источников, шаг моделирования, дата и общее время моделирования, количество пятен, скорость и направление ветра.

Расчет проводился в течение двух суток до проведения экспериментальных исследований при реальных на данный период гидрометеорологических условиях. Полагалось, что подводные источники, географические координаты которых совпадают с координатами эпицентров землетрясений (1 – 132,0; 42,35; 2 – 132,13; 42,47; 3 – 133,00; 42,37; 4 – 131,87; 42,50), каждую минуту выделяют очередную порцию метана, который растворяется в воде и в растворенном виде переносится с водными массами на акватории под влиянием суммарных течений.

На рис. 2 приведены результаты расчетов при движении судна из Владивостока. Цифровыми метками показаны источники метана – эпицентры землетрясений 2008 и 2009 гг. (синие звездочки), желтые линии и области – траектории движения водных масс с растворенным метаном, красные точки – положение водной массы на конец расчета, квадраты – местоположения отбора проб морской воды, цифры – концентрация метана (нмоль/л).

Непрерывное выделение метана в морскую среду из источника 3 южнее г. Находка под влиянием суммарных течений образует ареал распространения, северная часть которого

и зарегистрирована в экспериментальных данных в виде повышенных концентраций метана от 20 до 36 нмоль/л. Следует отметить, что два других источника 1 и 2 в центральной части залива, возможно, вызывают увеличение содержания метана на станциях южнее о-ва Аскольд.

На рис. 3 приведены результаты расчета на момент выполнения экспериментальных работ при обратном движении по маршруту судна. Обозначения те же, что и на рис. 2. Поле распространения метана носит неоднородный характер. От источника 1 образуется ветвь переноса водных масс, которая распространяется в южном направлении и формирует повышенные неоднородные концентрации метана в районе возвышенности Петра Великого. Данный расчет проводился при слабых южных ветрах, которые обусловили перенос водных масс от источников 2 и 4 в северном направлении, что способствовало возрастанию концентрации метана в районе каньона Гамова по экспериментальным данным.

Расчет потока метана на границе вода–атмосфера

Поток метана (F) определяется по формуле [5]:

$$F = K^{общ} \Delta C,$$

где $K^{общ}$ – коэффициент обмена на границе вода–воздух.

Разность концентраций метана в морской воде (ΔC) рассчитывается как разность между измеренной концентрацией метана и равновесной концентрацией, которую имел бы атмосферный метан в морской воде при данной температуре, солености и при атмосферном давлении и которая рассчитывается по формуле [9]:

$$\ln C_{eq} = \ln f_G + A_1 + A_2 \left(\frac{100}{T}\right) + A_3 \ln \left(\frac{T}{100}\right) + A_4 \left(\frac{T}{100}\right) + S \left[B_1 + B_2 \left(\frac{T}{100}\right) + B_3 \left(\frac{T}{100}\right)^2 \right], \quad (7)$$

где C_{eq} – равновесная концентрация (нмоль/л), f_G – мольная доля метана в атмосфере, T – температура воды ($^{\circ}\text{K}$), S – соленость (‰), а коэффициенты равны: $A_1 = -415,2807$, $A_2 = 596,8104$, $A_3 = 379,2599$, $A_4 = -62,0757$, $B_1 = -0,05916$, $B_2 = 0,032174$, $B_3 = -0,0048198$.

Расчет потоков метана на границе вода–атмосфера для гидрометеорологических условий во время проведения рейса показан на рис. 4.

Так как измерения проводились в теплый сезон, то повышение температуры воды до $16\text{--}21^{\circ}\text{C}$ привело к снижению растворимости метана в морской воде, вследствие чего происходит его выделение в атмосферу. Для всего района работ диапазон потока метана изменялся от 0 до $83 \text{ моль/км}^2 \cdot \text{сут}$ (среднее значение: $6 \text{ моль/км}^2 \cdot \text{сут}$), причем в шельфовых водах до изобаты 200 м эти значения приблизительно в 2 раза выше, чем в более мористых районах. Следует также отметить, что при движении из Владивостока после мыса Поворотный на акваториях шельфа во время максимальных температур и повышенных скоростей ветра значения потоков метана (от 6 до $43 \text{ моль/км}^2 \cdot \text{сут}$) выше, чем во время движения судна в обратном направлении по маршруту, проходящему в более мористых районах при более низких температурах и слабом ветре (от 0 до $13 \text{ моль/км}^2 \cdot \text{сут}$).

Как и в случае с районированием акватории Японского моря по уровню концентрации метана, район работ можно разделить на участки: а) прибрежные воды южного Приморья с концентрациями метана в диапазоне от 10,2 до 36,3 нмоль/л, где наблюдает-

ся максимальное выделение метана ($83 \text{ моль/км}^2 \cdot \text{сут}$) при диапазоне изменения от 8 до $83 \text{ моль/км}^2 \cdot \text{сут}$ (среднее значение $12 \text{ моль/км}^2 \cdot \text{сут}$); б) район возвышенности Петра Великого – диапазон потока метана от 0 до $3 \text{ моль/км}^2 \cdot \text{сут}$ (среднее значение $1 \text{ моль/км}^2 \cdot \text{сут}$); в) район каньона Гамова – диапазон потока метана от 0 до $1 \text{ моль/км}^2 \cdot \text{сут}$ (среднее значение $1 \text{ моль/км}^2 \cdot \text{сут}$); г) район возвышенности Витязь – диапазон потока метана от 0 до $13 \text{ моль/км}^2 \cdot \text{сут}$ при среднем значении $4 \text{ моль/км}^2 \cdot \text{сут}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные экспериментальные данные и результаты расчетов показали:

1. В сентябре-октябре 2010 г. на акватории северо-западной части Японского моря наблюдались повышенные концентрации метана в поверхностных морских водах, обусловленные, вероятно, серией землетрясений в рассматриваемом районе.

2. Летние температуры моря и значительные скорости ветров вызвали интенсивное выделение метана в атмосферу из морской воды, причем в шельфовых районах потоки метана значительно выше, чем в мористой части моря.

3. Сравнение экспериментальных данных и результатов расчета переноса водных масс, содержащих растворенный метан, свидетельствует о том, что район эпицентра землетрясения может выступать в роли источника поступления метана в морскую среду, хотя точные координаты источника (или источников) могут быть смещены вследствие неоднородности гео-

логических условий формирования как донных отложений, так и районов скопления углеводородов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта ДВО РАН №11-III-Д-07-015.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. М.: Мир, 1976. 756 с.
2. Мишуков В.Ф., Калинин В.В., Мишукова Г.И. Модель расчета переноса и трансформации нефтяного загрязнения в дальневосточных морях (на примере залива Петра Великого Японского моря) // Дальневосточные моря России: в 4 кн. / гл.ред. В.А. Акуличев. Кн.2: Исследование морских экосистем и биоресурсов / отв.ред. В.П. Челомин. М.: Наука, 2007. С. 267–298.
3. Мишукова Г.И., Мишуков В.Ф., Обжиров А.И. Особенности проявления метана в природных водах на территории Приморского края России // Вестн. ДВО РАН. 2009. № 6. С. 43–49.
4. Мишукова Г.И., Мишуков В.Ф., Обжиров А.И. Распределение метана и его потоки на границе вода–атмосфера в некоторых районах Охотского моря. // Вестн. ДВО РАН. 2010. № 6. С. 36–43.
5. Мишукова Г.И., Обжиров А.И., Мишуков В.Ф. Метан в пресных и морских водах и его потоки на границе вода–атмосфера в Дальневосточном регионе. Владивосток: Дальнаука, 2007. 159 с.
6. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Ч.1. М.: Наука, 1965. 363 с.
7. Фельзенбаум А.И. Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 120 с.
8. Яричин В.Г., Рыков Н.А. Постановки автономных буйковых станций на акватории залива Петра Великого. Владивосток: Изд-во ДВГУ, 2003.
9. Lammers S., Suess E. An improved head-space analysis method for methane in seawater // Marine Chemistry. 1994. Vol. 47. P. 115–125.
10. Wiessenburg D.A., Guinasso N.L. Equilibrium Solubility of Methane, Carbon Dioxide, and Hydrogen in Water and Sea Water // Journ. of Chemical Engineering Data. 1979. Vol. 24, № 4. P. 356–360.
11. U.S. Geological Survey, National Earthquake Information Center. World Data Center for Seismology. URL: http://neic.usgs.gov/neis/bulletin/neic_edau_1.html.