

УДК 551.465.551.468

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ ГЛУБИННЫХ СТОКОВ В ПРИБРЕЖНЫЕ АКВАТОРИИ

© 2006 г. В. Г. Бондур<sup>1</sup>, В. М. Журбас<sup>2</sup>, Ю. В. Гребенюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научный центр аэрокосмического мониторинга "Аэрокосмос", Москва

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Поступила в редакцию 20.04.2006 г.

Рассмотрены основные положения модели динамики турбулентной струи, создаваемой загубленным стоком в стратифицированной среде прибрежных акваторий. С использованием разработанной модели проведены оценки параметров всплывающей струи для глубоководного стока с о. Санд в акваторию б. Мамала (Гавайские о-ва) при различных вариантах сброса и в разные сезоны. На основании результатов модельных расчетов и экспериментальных данных по профилям температуры и солености проведены оценки горизонтов всплыивания и начального разбавления струй при реальных условиях стратификации среды, существовавших в исследуемом районе. Показано, что на распространение струй сбрасываемых вод существенное влияние оказывают приливо-отливные явления в акватории и вызванные ими внутренние волны. Зафиксированы моменты, когда турбулентные струи достигали поверхности. Проведено сравнение модельных оценок параметров стоков с результатами экспериментальных измерений и установлено их хорошее соответствие, что свидетельствуют об адекватном описании применяемой моделью физических механизмов распространения турбулентных струй в стратифицированной среде.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Возрастающие с каждым годом антропогенные воздействия на воды Мирового океана оказывают негативное влияние на его экосистемы и, прежде всего, на прибрежные акватории [1, 7–10, 12]. Одним из наиболее сильных источников загрязнения этих акваторий является захоронение (дампинг) загрязненных вод. Поэтому исследованию этого явления в последние годы уделяется все большее внимание [9, 10, 12].

Изучение процессов, связанных с воздействием загубленных стоков на прибрежные акватории, проводится путем выполнения гидрофизических измерений с помощью контактных датчиков [9, 14, 15, 17, 19], с использованием аэрокосмических методов [1, 3–5, 14, 16, 20], а также путем применения методов математического моделирования воздействий струи на водную среду [1, 3, 6, 11, 13].

Контактные измерения проводятся или с борта гидрофизических судов, или с помощью буйковых станций, устанавливаемых в различных местах исследуемой акватории. Гидрофизические измерения позволяют установить истинную картину загрязнений прибрежных зон, однако они трудоемки, требуют больших финансовых затрат и не позволяют проводить исследования на обширных акваториях.

В последние годы для мониторинга антропогенных воздействий на прибрежные акватории все более широкое применение находят методы аэрокосмического мониторинга [1–5, 14, 16, 20]. Аэрокос-

мические методы обеспечивают возможность исследования больших площадей акваторий с необходимой периодичностью и в течение длительного времени. Это позволяет анализировать пространственные, временные и сезонные зависимости характеристик исследуемых явлений [1, 14].

С использованием методов математического моделирования можно оценивать количественные характеристики изменений параметров водной среды, в том числе при антропогенных воздействиях, в различных гидрометеорологических условиях и осуществлять прогноз негативных влияний этих процессов на экологическое состояние прибрежных акваторий [1–3, 6, 9, 11, 13].

Как уже отмечалось, наиболее сильное антропогенное влияние на экосистемы прибрежных акваторий оказывают глубинные стоки. Для снижения негативных воздействий на водную среду дампинг осуществляют по загубленным трубопроводам на достаточно большом удалении от берега и на значительной глубине [9]. Диффузоры сбросовых устройств стремятся расположить ниже слоя скачка плотности, так как он препятствует подъему сбрасываемых вод на поверхность. Однако плотностная стратификация морской воды подвержена значительным суточным и сезонным колебаниям. При ее ослаблении могут возникать ситуации, когда сбрасываемые воды будут подниматься до поверхности, оказывая неблагоприятное воздействие на прибрежные акватории.

Следует отметить, что в процессе распространения глубинных стоков важную роль играют такие особенности прибрежных зон как приливно-отливные явления и апвеллинг – подъем вод, который связан со сгоном поверхностного слоя воды из прибрежной зоны в открытое море вследствие экмановского переноса.

Возрастающее с каждым годом загрязнение прибрежных зон морей и океанов за счет воздействия сбрасываемых вод заставляет искать способы минимизации этих негативных процессов. Естественно, что наиболее радикальным методом решения такой проблемы являлось бы полное прекращение сбросов или их предварительная очистка до допустимых концентраций вредных веществ. Однако необходимые для этого мероприятия требуют очень больших затрат. Поэтому их реализация в ближайшие годы недостижима. В связи с этим необходимо использовать другие способы и возможности снижения негативных воздействий заглубленных сбросов на прибрежные акватории.

Важную роль в решении этой проблемы играют применение эффективных методов мониторинга и использование прогнозных математических моделей, позволяющих оценить поведение струй при различных гидрометеорологических условиях и предсказывать возникновение наиболее неблагоприятных и благоприятных ситуаций для сбросов. Это способствует применению эффективных мероприятий для снижения уровня негативных антропогенных влияний на прибрежные акватории.

Рассмотрим более подробно возможности методов математического моделирования для исследования воздействий заглубленных стоков на прибрежные акватории.

## 2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СТРУЙ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ СРЕДЕ

Захоронения сбрасываемых вод в море обычно производится через сбросовые устройства, расположенные в придонном слое, которые могут иметь различную конструкцию. Однако все они создают в морской воде турбулентные струи, которые, как правило, отличаются по плотности от окружающей водной среды [3, 11, 13]. В связи с этим сбрасываемые пресные воды будут вспывающими.

В качестве начальных параметров при моделировании турбулентной струи выберем: расход  $Q$ , который определяется как объем жидкости, проходящей через поперечное сечение струи за единицу времени; импульс или количество движения  $M$ , равный произведению расхода струи на ее

скорость; разность плотностей воды в струе и в море на горизонте сброса  $\Delta p$ , которая определяет вместе с расходом запас плавучести струи [3]:

$$F = g \Delta p Q / \rho_0,$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho_0$  – плотность среды на горизонте сброса.

В процессе распространения турбулентной струи ее расход возрастает вследствие вовлечения в движение окружающей воды. Если среда однородна по плотности и разность плотностей среды и струи равна нулю, то в процессе распространения струи ее импульс сохраняется. В противном случае сохраняется только горизонтальный компонент импульса, тогда как вертикальный компонент изменяется под действием сил плавучести.

В случае, когда среда однородна по плотности, но ее плотность не равна плотности среды, при распространении струи сохраняется запас плавучести (при условии линейности уравнения состояния воды) и струя потенциально всплывает до бесконечности [3]. Если рассмотреть жидкий (Лагранжев) элемент вспывающей струи в устойчиво стратифицированной среде, то из-за перемещивания с окружающими водами его плотность будет повышаться, а плотность окружающей его воды – понижаться (поскольку элемент перемещается вверх). Поэтому на некотором горизонте разность плотностей обратится в нуль и струя перестанет всплывать.

На практике важно уметь рассчитывать горизонт всплытия струи, достигаемое в процессе всплытия разбавление, а также толщину слоя, в котором будут локализованы стоки после окончания процесса всплытия (масштаб Озмидова [13]). Для решения поставленной задачи воспользуемся следующей моделью вспывающей струи [3, 6, 11, 13].

Пусть на некоторой глубине  $z_0$  в среду под углом  $\Theta_0$  к горизонту в плоскости  $xz$  вспрыкивается стационарная турбулентная струя (ось  $z$  направлена вверх). Среда несжимаема, неподвижна, а ее плотность  $\rho_a(z)$  зависит от вертикальной координаты, причем  $d\rho_a/dz < 0$ , то есть среда устойчиво стратифицирована. Будем считать, что плотность струи  $\rho(z)$  на горизонте  $z_0$  меньше плотности среды:  $\rho(z_0) = \rho_1 < \rho_a(z_0)$ . Поэтому струя будет вспывающей.

Рассмотрение ведется в системе координат, связанной со струей (рис. 1):  $s$  – координата вдоль оси струи,  $r$  – радиальная координата,  $\Phi$  – угол между плоскостью  $xz$  и заданным радиус-вектором. Предполагается, что профили скорости  $u^*$  в поперечных сечениях струи, а также профили раз-

ности плотностей среды и струи ( $\rho_a^* - \rho$ ) подобны друг другу и описываются Гауссовыми кривыми:

$$u^*(s, r, \phi) = u(s) \exp(-r^2/b^2), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\rho_a^*(s, r, \phi) - \rho^*(s, r, \phi)}{\rho_0} &= \\ &= \frac{\rho_a(s) - \rho(s)}{\rho_0} \exp\left[-\frac{r^2}{\lambda^2 b^2}\right], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $u(s)$  и  $\rho(s)$  – скорость и плотность на оси струи,  $\rho_0 = \rho_a(0)$  – отсчетная плотность,  $b = b(s)$  – характерная полуширина струи,  $\lambda = 1.16$  – константа, описывающая тот экспериментальный факт, что профили разности плотностей в струе несколько более размыты, чем профили скорости. Предположение (1) и (2) об осесимметричном распространении струи в устойчиво стратифицированной среде допустимо лишь на начальной (активной) фазе [3].

Распространение струи может быть описано системой уравнений, которая получается путем интегрирования уравнений неразрывности, движения и баланса тепла и соли. Интегрирование производится по поперечному сечению струи при предположениях об автомодельности профилей скорости вида (1), температуры и солености, аналогичных (2). Причем использование уравнений баланса тепла и соли связано с необходимостью учета нелинейности уравнения состояния морской воды, игнорирование которого может существенно исказить результаты расчетов, а в случае низких температур и малой солености водоема может даже привести к принципиальным ошибкам (например, предсказать всплытие струи вместо заглубления [1]).

Система уравнений имеет вид:

$$\frac{d}{ds}(ub^2) = 2\alpha ub, \quad (3)$$

$$\frac{d}{ds}(u^2 b^2 \cos \Theta) = 0, \quad (4)$$

$$\frac{d}{ds}(u^2 b^2 \sin \Theta) = 2g \lambda^2 b^2 \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_0}, \quad (5)$$

$$\frac{d}{ds}[ub^2(T_a - T)] = \frac{1 + \lambda^2}{\lambda^2} b^2 u \frac{dT_a}{ds}, \quad (6)$$

$$\frac{d}{ds}[ub^2(S_a - S)] = \frac{1 + \lambda^2}{\lambda^2} b^2 u \frac{dS_a}{ds}, \quad (7)$$

где  $T_a(s)$  и  $S_a(s)$  – температура и соленость среды;  $T(s)$  и  $S(s)$  – температура и соленость струи,  $\alpha = 0.057$  – коэффициент вовлечения.

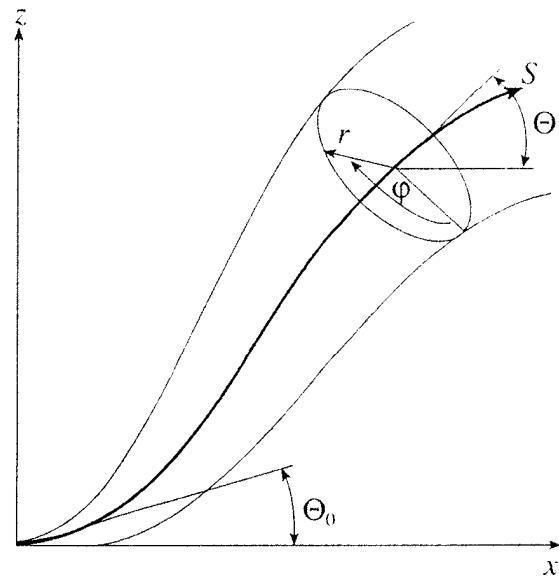


Рис. 1. Схема всплывающей струи в устойчиво стратифицированной жидкости.

Система (3)–(7) дополняется двумя геометрическими соотношениями, связывающими собственные координаты струи  $s$  и  $\Theta$  с декартовыми координатами  $x$  и  $z$ , а также уравнением состояния воды:

$$\frac{dx}{ds} = \cos \Theta, \quad (8)$$

$$\frac{dz}{ds} = \sin \Theta, \quad (9)$$

$$\rho = \rho(T, S). \quad (10)$$

Уравнение состояния связывает температуру и соленость с плотностью и не включает в себя давление, так как речь идет о потенциальной плотности.

Таким образом, получается замкнутая система из семи обыкновенных дифференциальных уравнений (3)–(9) и уравнения состояния воды (10) с восемью зависимыми переменными  $u, b, T, S, \rho, x, y, \Theta$  и одной независимой переменной  $s$ .

Эту систему можно дополнить уравнением для среднего времени  $t$  прохождения жидкого элемента струи вдоль ее траектории:

$$dt = \frac{ds}{\bar{u}} = \frac{2ds}{u}, \quad (11)$$

где средняя скорость определяется из условия, что Гауссово распределение скорости (1) заменяется на постоянную скорость  $\bar{u} = u/2$  в сечении струи с радиусом  $\bar{b} = \sqrt{2b}$  при сохранении расхода импульса.

происходит под действием турбулентной диффузии и течений, существующих в прибрежной зоне [3]. Пассивная фаза струи характеризуется следующими особенностями [3]:

- турбулентное вовлечение прекращается,
- горизонтальный размер растет, а рост вертикального размера прекращается,
- на боковых границах может развиваться термохалинная неустойчивость (интрузивное расслоение),
- на верхней и нижней границах могут развиваться конвективные процессы двойной диффузии ("солевые пальцы"), приводящие к значительному увеличению вертикального объема,
- примесь переносится течениями и рассеивается под действием горизонтальной диффузии,
- происходит сепарация взвесей.

С использованием описанной модели была составлена программа для расчетов характеристик всплывающих струй.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ХАРАКТЕРИСТИК ВСПЛЫВАЮЩИХ СТРУЙ

С помощью компьютерной программы, реализующей описанную выше теорию, были проведены расчеты характеристик всплывающих струй для реально действующего сбросового устройства на о. Санд (Гонолулу, Гавайские о-ва), для которого имелись данные о параметрах стока и характеристиках морской среды [18, 21]. Система обеспечивает усовершенствованную первичную обработку в среднем 70 млн. галлонов (31.8 тыс. м<sup>3</sup>) сбрасываемых вод ежедневно [18]. Полная длина океанской части трубопровода до диффузора составляет 3816 м при внутреннем диаметре коллектора 213 см. Диффузор, через который сбрасываемые воды попадают в акваторию б. Мамала, располагается на глубине 69–72 м. Длина диффузора равна 1036 м, он содержит 275 отверстий диаметром 7.8–12.7 см, проделанных в основной трубе с шагом 3.66 м поочередно с двух различных сторон трубы. Средний расход стоков равен 4.48 м<sup>3</sup>/с при номинальной скорости истечения из отверстий ~3 м/с.

Таким образом, в качестве входных параметров модели одной струи мы можем принять расход  $Q_0 = 4.48/275 \text{ м}^3/\text{с} = 0.0163 \text{ м}^3/\text{с}$  и скорость истечения  $u_0 = 3 \text{ м/с}$ . Температура сбрасываемых вод колеблется в пределах 23.3–27.3°C. Для модельных расчетов принимаем  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ . Температура океана на глубине диффузора колеблется в пределах 21...24°C.

Поскольку сбрасывается загрязненная пресная вода, прошедшая предварительную очистку, то для модельных оценок примем  $S_0 = 0 \%$ . При этом

можно ожидать, что задаваемая в модели начальная плотность струи будет несколько заниженной, что позволит получать верхние оценки горизонта всплыния. Горизонт, на котором происходит сброс воды, зададим как  $z_0 = -70 \text{ м}$ . Для проведения модельных расчетов использовались вертикальные профили плотности, измеренные в районе сброса в различные сезоны, которые приведены на рис. 2а [18].

Модельные расчеты параметров всплывающей струи были проведены для 4-х вариантов стока:

**Вариант 1.** Сброс производится в горизонтальном направлении в виде невзаимодействующих осесимметричных струй с расходом, равным расходу из каждого из  $n = 275$  отверстий:  $ub^2 = Q_0/\pi n = 0.00519 \text{ м}^3/\text{с}$ , где  $Q_0 = 4.48 \text{ м}^3/\text{с}$  – средний проектный расход, при номинальной скорости истечения  $u_{\text{ист}} = 3 \text{ м/с}$ . Импульс струи равен  $u^2 b^2 = Q_0 u_{\text{ист}}/\pi n = 0.0156 \text{ м}^4/\text{с}^2$ ;

**Вариант 2.** Сброс производится в двух противоположных горизонтальных направлениях из плоских струй с расходом  $ub = Q_0/2\sqrt{\pi}L = 0.00122 \text{ м}^2/\text{с}$ , где  $L = 1036 \text{ м}$  – длина диффузора. Номинальная скорость истечения  $u_{\text{ист}} = 3 \text{ м/с}$ . Импульс струи равен  $u^2 b = Q_0 u_{\text{ист}}/\sqrt{2\pi}L = 0.00519 \text{ м}^3/\text{с}^2$ :

**Вариант 3.** Сброс производится в горизонтальном направлении в виде единственной осесимметричной струи с расходом  $ub^2 = Q_0 u_{\text{ист}}/\pi = 1.478 \text{ м}^3/\text{с}$  (при среднем расходе для этого случая  $Q_0 = 4.64 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Номинальная скорость истечения  $u_{\text{ист}} = 3 \text{ м/с}$ . Импульс струи равен  $u^2 b^2 = Q_0 u_{\text{ист}}/\pi = 4.433 \text{ м}^4/\text{с}^2$ ;

**Вариант 4.** Сброс производится в горизонтальном направлении из плоской струи с расходом  $ub = Q_0/\sqrt{\pi}L = 0.00244 \text{ м}^2/\text{с}$  (при  $Q_0 = 4.48 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Номинальная скорость истечения  $u_{\text{ист}} = 3 \text{ м/с}$ . Импульс струи равен  $u^2 b = Q_0 u_{\text{ист}}/\sqrt{\pi/2}L = 0.01035 \text{ м}^3/\text{с}^2$ .

На рис. 2б показаны рассчитанные траектории струй для этих четырех вариантов сброса в акваторию б. Мамала в августе месяце. Как видно из рис. 2б, если сброс осуществлять в этот период времени в виде единой горизонтальной струи из круглого отверстия (точечная линия), то образующийся факел достигнет поверхности моря даже летом, когда стратификация моря наиболее устойчива. Наиболее благоприятным с точки зрения минимальной глубины всплыивания факела, как и следовало ожидать, является вариант двух плоских разнонаправленных горизонтальных струй (пунктир), когда струя достигает горизонта 46 м. Если же плоскую струю выпускать горизонтально с одной стороны при прежних суммарном расходе и импульсе, то горизонт всплыивания будет равен 37 м (штрих-пунктир). Почти таким же (38 м) будет горизонт всплыивания, если рассмат-

происходит под действием турбулентной диффузии и течений, существующих в прибрежной зоне [3]. Пассивная фаза струи характеризуется следующими особенностями [3]:

- турбулентное вовлечение прекращается,
- горизонтальный размер растет, а рост вертикального размера прекращается,
- на боковых границах может развиваться термохалинная неустойчивость (интрузивное расслоение),
- на верхней и нижней границах могут развиваться конвективные процессы двойной диффузии ("солевые пальцы"), приводящие к значительному увеличению вертикального объема,
- примесь переносится течениями и рассеивается под действием горизонтальной диффузии,
- происходит сепарация взвесей.

С использованием описанной модели была составлена программа для расчетов характеристик всплывающих струй.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ХАРАКТЕРИСТИК ВСПЛЫВАЮЩИХ СТРУЙ

С помощью компьютерной программы, реализующей описанную выше теорию, были проведены расчеты характеристик всплывающих струй для реально действующего сбросового устройства на о. Санд (Гонолулу, Гавайские о-ва), для которого имелись данные о параметрах стока и характеристиках морской среды [18, 21]. Система обеспечивает усовершенствованную первичную обработку в среднем 70 млн. галлонов (31.8 тыс. м<sup>3</sup>) сбрасываемых вод ежедневно [18]. Полная длина океанской части трубопровода до диффузора составляет 3816 м при внутреннем диаметре коллектора 213 см. Диффузор, через который сбрасываемые воды попадают в акваторию б. Мамала, располагается на глубине 69–72 м. Длина диффузора равна 1036 м, он содержит 275 отверстий диаметром 7.8–12.7 см, проделанных в основной трубе с шагом 3.66 м поочередно с двух различных сторон трубы. Средний расход стоков равен 4.48 м<sup>3</sup>/с при номинальной скорости истечения из отверстий ~3 м/с.

Таким образом, в качестве входных параметров модели одной струи мы можем принять расход  $Q_0 = 4.48/275 \text{ м}^3/\text{с} = 0.0163 \text{ м}^3/\text{с}$  и скорость истечения  $u_0 = 3 \text{ м/с}$ . Температура сбрасываемых вод колеблется в пределах 23.3–27.3°C. Для модельных расчетов принимаем  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ . Температура океана на глубине диффузора колеблется в пределах 21...24°C.

Поскольку сбрасывается загрязненная пресная вода, прошедшая предварительную очистку, то для модельных оценок примем  $S_0 = 0\%$ . При этом

можно ожидать, что задаваемая в модели начальная плотность струи будет несколько заниженной, что позволит получать верхние оценки горизонта всплыния. Горизонт, на котором происходит сброс воды, зададим как  $z_0 = -70 \text{ м}$ . Для проведения модельных расчетов использовались вертикальные профили плотности, измеренные в районе сброса в различные сезоны, которые приведены на рис. 2а [18].

Модельные расчеты параметров всплывающей струи были проведены для 4-х вариантов стока:

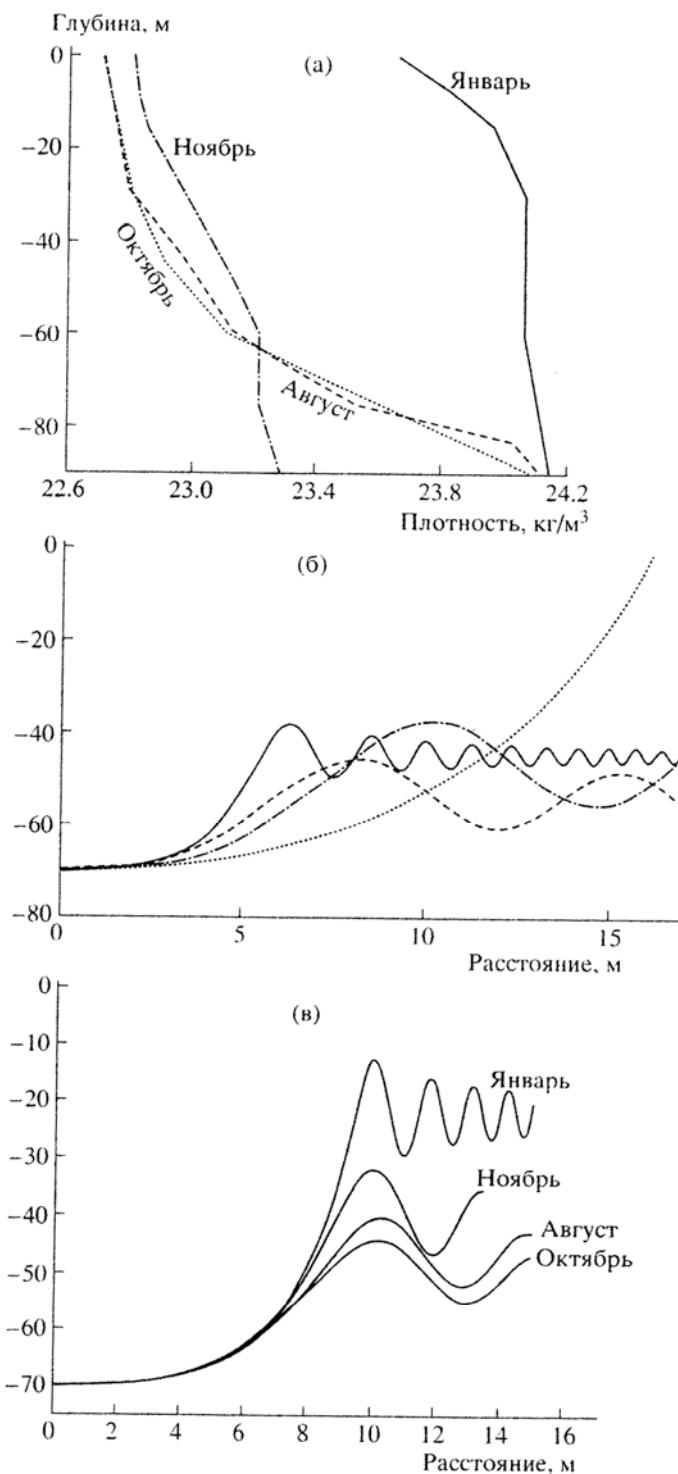
**Вариант 1.** Сброс производится в горизонтальном направлении в виде невзаимодействующих осесимметричных струй с расходом, равным расходу из каждого из  $n = 275$  отверстий:  $ub^2 = Q_0/\pi n = 0.00519 \text{ м}^3/\text{с}$ , где  $Q_0 = 4.48 \text{ м}^3/\text{с}$  – средний проектный расход, при номинальной скорости истечения  $u_{\text{ист}} = 3 \text{ м/с}$ . Импульс струи равен  $u^2 b^2 = Q_0 u_{\text{ист}}/\pi n = 0.0156 \text{ м}^4/\text{с}^2$ ;

**Вариант 2.** Сброс производится в двух противоположных горизонтальных направлениях из плоских струй с расходом  $ub = Q_0/2\sqrt{\pi}L = 0.00122 \text{ м}^2/\text{с}$ , где  $L = 1036 \text{ м}$  – длина диффузора. Номинальная скорость истечения  $u_{\text{ист}} = 3 \text{ м/с}$ . Импульс струи равен  $u^2 b = Q_0 u_{\text{ист}}/\sqrt{2\pi}L = 0.00519 \text{ м}^3/\text{с}^2$ :

**Вариант 3.** Сброс производится в горизонтальном направлении в виде единственной осесимметричной струи с расходом  $ub^2 = Q_0 u_{\text{ист}}/\pi = 1.478 \text{ м}^3/\text{с}$  (при среднем расходе для этого случая  $Q_0 = 4.64 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Номинальная скорость истечения  $u_{\text{ист}} = 3 \text{ м/с}$ . Импульс струи равен  $u^2 b^2 = Q_0 u_{\text{ист}}/\pi = 4.433 \text{ м}^4/\text{с}^2$ ;

**Вариант 4.** Сброс производится в горизонтальном направлении из плоской струи с расходом  $ub = Q_0/\sqrt{\pi}L = 0.00244 \text{ м}^2/\text{с}$  (при  $Q_0 = 4.48 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Номинальная скорость истечения  $u_{\text{ист}} = 3 \text{ м/с}$ . Импульс струи равен  $u^2 b = Q_0 u_{\text{ист}}/\sqrt{\pi/2}L = 0.01035 \text{ м}^3/\text{с}^2$ .

На рис. 2б показаны рассчитанные траектории струй для этих четырех вариантов сброса в акваторию б. Мамала в августе месяце. Как видно из рис. 2б, если сброс осуществлять в этот период времени в виде единой горизонтальной струи из круглого отверстия (точечная линия), то образующийся факел достигнет поверхности моря даже летом, когда стратификация моря наиболее устойчива. Наиболее благоприятным с точки зрения минимальной глубины всплыивания факела, как и следовало ожидать, является вариант двух плоских разнонаправленных горизонтальных струй (пунктир), когда струя достигает горизонта 46 м. Если же плоскую струю выпускать горизонтально с одной стороны при прежних суммарном расходе и импульсе, то горизонт всплыивания будет равен 37 м (штрих-пунктир). Почти таким же (38 м) будет горизонт всплыивания, если рассмат-



**Рис. 2.** Параметры траекторий всплывающей струи в устойчиво стратифицированной жидкости в зависимости от вариантов стока и сезонов года. (а) – вертикальные профили плотности в районе сброса в акваторию б. Мамала (Гонолулу, Гавайи) по данным измерений в различные месяцы [18]; (б) – траектории струй при различных вариантах сброса: 1-й вариант – сплошная линия; 2-й вариант – пунктир; 3-й вариант – точечная линия; 4-й вариант – штрих-пунктир; (в) – траектории струй глубинного стока в акваториях б. Мамала (Гонолулу, Гавайи) в различные сезоны года.

ривать независимо осесимметричную горизонтальную струю из одного из 275 отверстий (сплошная линия).

Реализованное на практике сбросовое устройство с о. Санд (Гонолулу, Гавайи) представляет собой комбинацию вариантов 1 и 2. Действительно, поскольку расстояние между отверстиями с одной стороны диффузора весьма велико (7.3 м), то вблизи диффузора, где ширина струй существенно меньше половины расстояния между отверстиями, они распространяются независимо друг от друга, т.е. реализуется вариант 1. И только на некотором расстоянии от диффузора становится приемлемым описание в виде плоской струи (вариант 2). Расчеты для вариантов 1 и 2 различаются незначительно, поэтому дальнейшие расчеты будем проводить для осесимметричной струи (вариант 1).

На рис. 2в даны траектории струи глубинного стока, рассчитанные для различных сезонов по профилям плотности, приведенным на рис. 2а [18]. Струя оказалась затопленной во все представленные сезоны, причем в январе горизонт вселывания находился ближе всего к поверхности и составлял всего  $z_0 = -12.7$  м.

На рис. 3а в качестве примера показана траектория струи сбрасываемой воды в акваторию б. Мамала в январе месяце, и изменение вдоль траектории основных параметров струи: расхода  $Q/Q_0$ ; разности температуры  $T - T_a$ ; плотности  $\rho - \rho_a$ . Как видно из рис. 3а разность плотностей быстро убывает по абсолютной величине, обращаясь в нуль прежде, чем струя достигает точки максимального вселывания, а затем совершают затухающие колебания в противофазе с траекторией струи. Разбавление струи монотонно возрастает. Причем скорость возрастания колеблется с длиной волны в 2 раза меньшей, чем колебания самой траектории, будучи минимальной в экстремальных точках траектории. Разность температуры, в целом, ведет себя аналогично разности плотностей. Некоторые "изломы" кривой  $T - T_a = f(x)$  не трудно объяснить, приняв во внимание особенности профиля плотности (а, следовательно, и температуры) моря в январе месяце (рис. 2а).

Однако следует напомнить, что хотя колебания траектории струи действительно имеют место, данная модель не в состоянии описать их количественно, так как используемое в ней условие осесимметричности струи нарушается после достижения максимальной точки траектории.

Сведения о горизонте вселывания  $z_0$ , начальном разбавлении  $D = Q(z_0)/Q_0$  и толщине слоя распространения струи, полученной по формулам (15) и (17), для различных сезонов года даны в таблице. Как следует из таблицы, начальное разбавление максимальное в зимний сезон ( $D = 836$ ), когда стратификация толщи воды минимальна, а высота вселывания струи максимальна. Мини-

Характеристики струи стоков от сбросового устройства на о. Санд (Гонолулу, Гавайи) в различные сезоны (горизонт вселывания  $z_0$ , начальное разбавление  $D$  и толщина слоя распространения  $h_*$ )

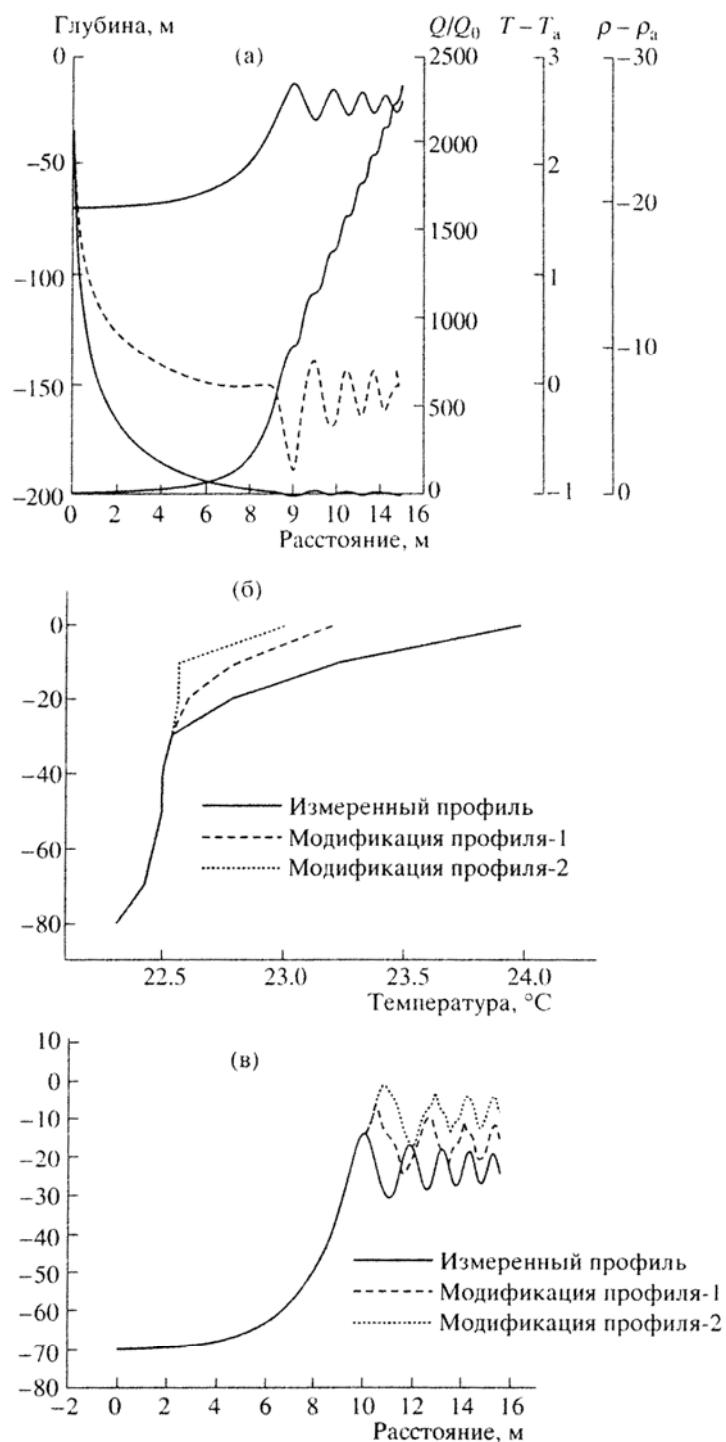
| Параметр                 | Месяц  |        |         |        |
|--------------------------|--------|--------|---------|--------|
|                          | январь | август | октябрь | ноябрь |
| $z_0$ , м                | -12.7  | -40.4  | -44.4   | -32.3  |
| $D$                      | 836    | 275    | 224     | 413    |
| $h_*$ , м<br>(ф-ла (15)) | 3.9    | 4.4    | 5.1     | 4.9    |
| $h_*$ , м<br>(ф-ла (17)) | 6.2    | 7.3    | 9.1     | 8.5    |

мальное же разбавление ( $D = 224$ –274) имеет место в конце лета – начале осени, когда стратификация толщи максимальна и, как следствие, высота вселывания струи минимальна. Проведенные расчеты показывают, что при неизменных параметрах стока горизонт подъема струи определяется характеристиками стратификации морской среды, (распределением температуры и солености воды по глубине). В зимний период года величина градиента плотности, характеризующего устойчивость стратификации среды, имеет минимальное значение. Поэтому в это время могут возникать условия, при которых стратификация настолько ослаблена, что она не препятствует подъему сбрасываемых вод в поверхностный слой. Ослабление стратификации может происходить, например, под воздействием прибрежного апвеллинга, о котором говорилось ранее.

Были проведены модельные расчеты высоты подъема струи для случая ослабленной стратификации среды в зимний период года. С этой целью экспериментально измеренный в январе месяце профиль температуры модифицировался для глубин 0–20 м, и по модифицированному профилю проводился расчет высоты подъема струи. Соленость морской воды при модельных расчетах считалась неизменной и равной  $S_d(z) = 35\%$ .

На рис. 3б приведен измеренный профиль температуры в акватории б. Мамала для января месяца и два варианта его модификации. Результаты расчетов уровней подъема струи для этих 3-х профилей температуры приведены на рис. 3в. Видно, что при слабом изменении профиля (уменьшение градиента температуры составляет 0.9) струя поднимается до горизонта –6 м, а при несколько большем (уменьшение градиента температуры составляет 0.8) – достигает поверхности. Приведенные оценки показывают, что в зимние месяцы при достаточно небольшом ослаблении плотностной стратификации струя сбрасываемых вод может достигать поверхностного слоя.

Оценивались также возможные уровни вселывания струи в летний период. Для проведения расчет-



**Рис. 3.** Модельные оценки характеристик всплывающей струи в январе месяце. (а) – траектория струи Z, разбавление  $Q/Q_0$ , разность температуры  $T - T_a$  и плотности  $\rho$  и  $\rho_0$  сбрасываемых вод и окружающей воды в акватории б. Мамала; (б) – вертикальные профили температуры морской воды в акватории б. Мамала; (в) – траектории всплывающих струй для распределений температуры по глубине, приведенных на рис. 2а.

тов использовались данные о значениях градиентов температуры в акватории б. Мамала в районе сброса, приведенные в [18].

На рис. 4а представлены графики вертикальных распределений температуры в летний период года для 3-х значений градиента температуры – малого, среднего и большого. Результаты расчетов горизонта вслывания струи для этих 3-х летних профилей температуры представлены на рис. 4б. Видно, что при условиях слабой стратификации среды (небольшой градиент температуры) струя поднимается до уровня – 10 м.

Проведенные модельные расчеты показывают, что даже в летние месяцы могут возникать условия, при которых сбрасываемые воды могут подниматься в поверхностные слои.

Толщина слоя распространения сбрасываемой воды зависит от локальной стратификации на горизонте вслывания струи. При этом оценки  $h_*$ , произведенные по формуле (17), оказались несколько выше оценок, полученных по формуле (15). В данном случае мы склонны более доверять оценкам, произведенным по формуле (17), так как для нашего случая выполняется условие  $(g|\Delta\rho|/\rho_0)/(Nu_0) \approx 0.1 \ll 1$ . Поэтому струя является “квазивертикальной”, что хорошо соответствует формам траекторий, приведенным на рис. 2в.

#### 4. ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СТРУИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

В акватории б. Мамала в районе о. Санд проводился комплексный мониторинг антропогенных воздействий глубоководных сбросов на экосистемы прибрежных акваторий [14]. При проведении этих исследований выполнялась съемка прибрежной акватории с космических аппаратов, а также подспутниковые измерения гидрофизических, биологических и химических характеристик водной среды [14, 15, 17, 19]. Результаты анализа космических изображений сделаны в работах [1, 5, 14, 16, 20]. Результаты контактных измерений использовались в качестве входных данных для проведения расчетов, а также для верификации предложений модели.

Следует отметить, что в б. Мамала существуют достаточно сильные приливо-отливные течения (среднее значение изменения уровня океана составляет  $\sim 0.3$  м), оказывающие большое влияние на различные гидрофизические процессы, в том числе и на распространение струй сбрасываемых вод [15, 21].

Для проведения численных расчетов использовались параметры стратификации среды, измеренные с помощью нескольких закоренных буйковых станций [14, 15, 17, 19]. Результаты измерений температуры и солености морской воды на станции, расположенной вблизи диффузора, использо-

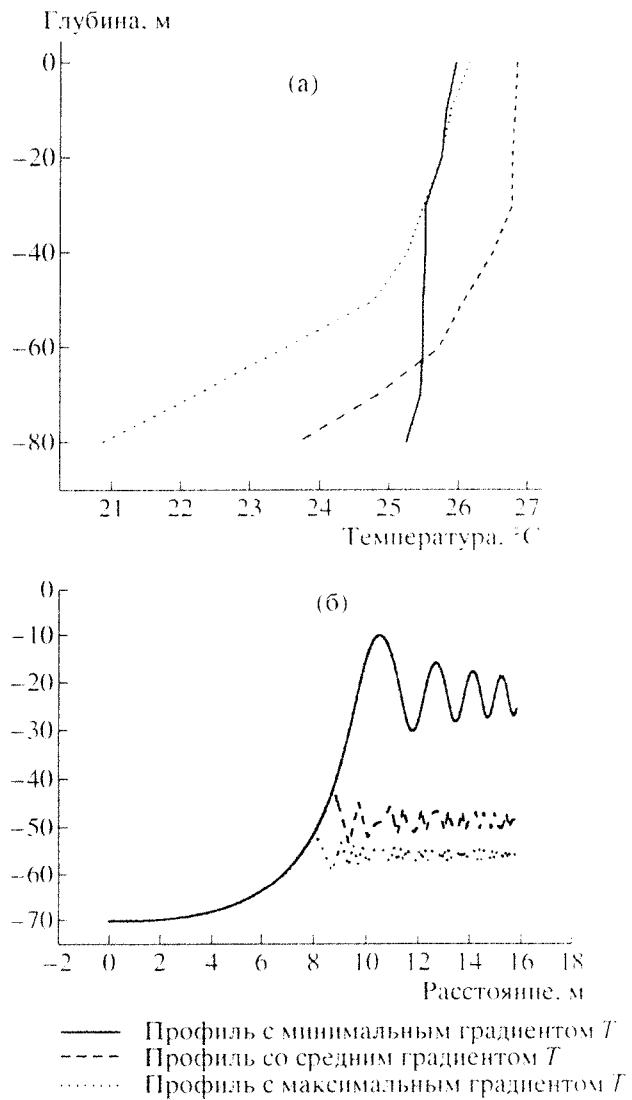


Рис. 4. Модельные оценки характеристик вслывающей струи в акватории б. Мамала в летний период года. (а) – вертикальные профили температуры морской воды; (б) – траектории вслывающих струй для распределений температуры по глубине, приведенных на рис. 3а.

вались для вычисления вертикальных профилей плотности в различные фазы прилива [14, 16, 18]. Это давало возможность оценить влияние приливов и вызванных ими внутренних волн на параметры вслывающей струи сбрасываемых вод.

На рис. 5а приведен временной ход распределения температуры морской воды по глубине вблизи диффузора. Из этого рисунка видно, что под действием внутренних волн приливного характера происходили периодические изменения температуры, амплитуда которых на глубинах 50–60 м достигала 3–4°C. С уменьшением глубины амплитуда колебаний температуры снижалась и на глубинах 35–40 м составляла 1.0–1.5°C [15, 17].

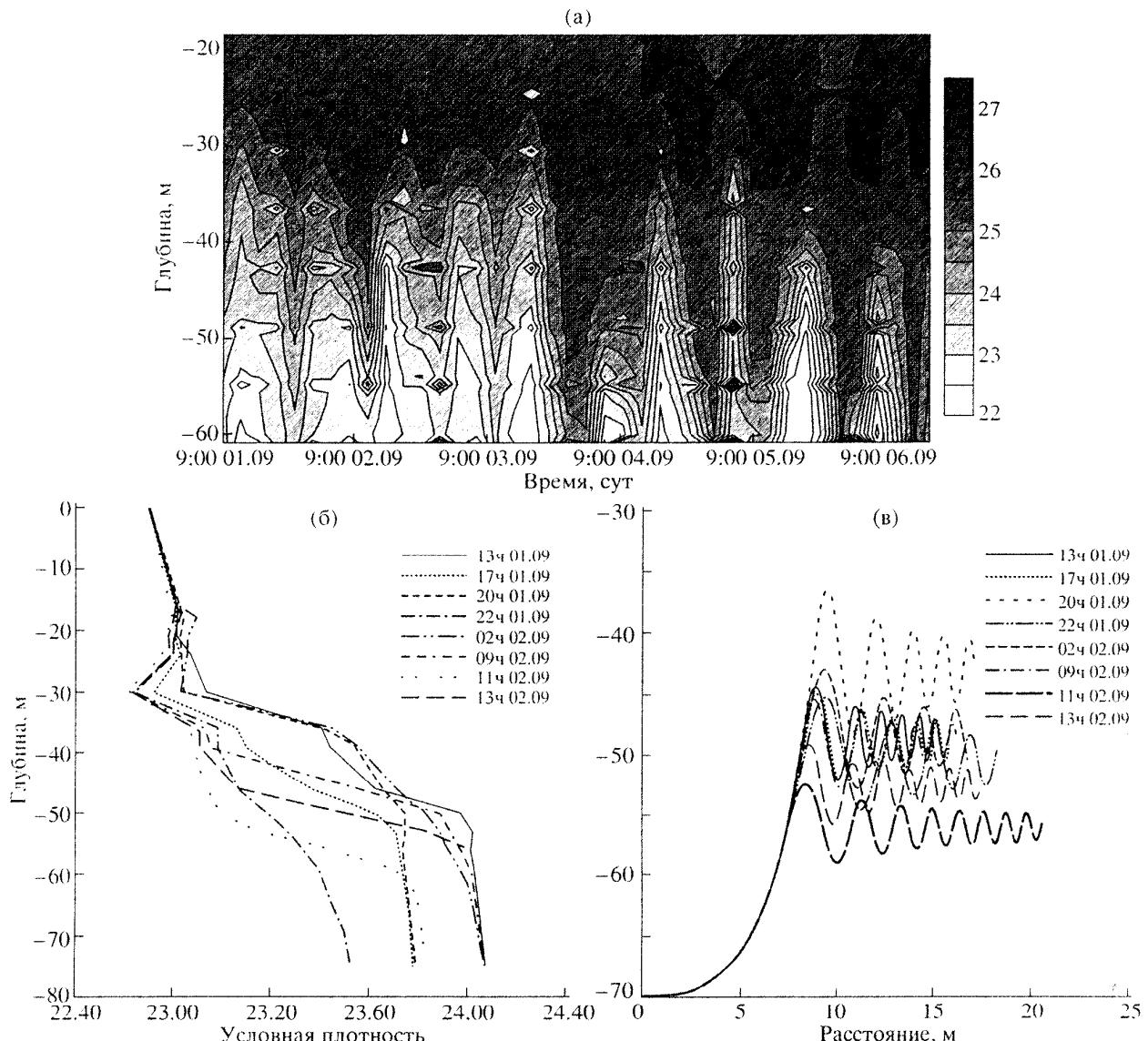


Рис. 5. Характеристики среды в б. Мамала по результатам натурных измерений. (а) – временной ход температуры морской воды в б. Мамала на глубинах 18–60 м в период с 1 по 6.09.2002 г.; (б) – вертикальные профили плотности морской воды в б. Мамала в период с 13 ч 1.09 по 13 ч 2.09.2002 г.; (в) – траектории распространения струй сточных вод в б. Мамала, рассчитанные по данным профилей плотности на рис. 5б.

Среднечасовые вертикальные профили плотности, построенные для 8-ми моментов времени в период с 13 ч 1 сентября 2002 г. до 13 ч 2 сентября 2002 г. приведены на рис. 5б. В исследуемый период времени интенсивный слой скачка плотности располагался на глубинах 30–50 м.

Траектории распространения всплывающих струй для отмеченных моментов времени представлены на рис. 5в. На рис. ба приведены графики уровня подъема струи и значений градиента плотности для 8-ми моментов времени в период 1–2 сентября 2002 г. Из этих рисунков видно, что в рассматриваемый период времени струя не поднималась выше глубины 36 м, т.е. выше горизонта

расположения слоя скачка плотности. Подъему струи ближе к поверхности препятствовал слой скачка плотности со значительным градиентом.

Максимальный уровень подъема струи до горизонта –36 м (см. рис. ба), наблюдался для момента времени 20 ч 1 сентября 2002 г. Из рис. 6б видно, что в данный момент времени была наиболее слабая стратификация плотности морской воды за исследуемый период времени.

С помощью разработанной модели были получены также оценки начального разбавления сбрасываемых вод. На рис. 6б представлены графики изменения величины разбавления  $Q/Q_0$  и градиента плотности  $\Delta\rho/\Delta z$  для исследуемого интервала

времени. Из приведенного рисунка видно, что наиболее слабой стратификации морской среды соответствует наибольшее значения разбавления сбрасываемых вод.

Начиная с 3 сентября 2002 г., в б. Мамала произошли существенные изменения поля температуры. Из временного хода температуры, приведенного на рис. 5а, видно, что в этот период квазиоднородный слой опустился на большие глубины, временами занимая весь водный столб от поверхности до 60 м. Средняя температура слоя при этом существенно повысилась. Так, если в течение первых 2-х суток наблюдения средняя температура слоя составляла  $\sim 25.5^{\circ}\text{C}$  при амплитуде флюктуаций 1–2°C, то в дальнейшем она в среднем повысилась до  $26.5\text{--}26.7^{\circ}\text{C}$ , а уровень флюктуаций стал достигать 3–4°C. Естественно, что изменения температурных свойств воды оказались на характеристиках стратификации водных масс. Уровень стратификации морской воды в б. Мамала в период с 3 по 6 сентября 2002 г. стал изменяться в широких пределах, временами достигая очень малых значений.

На рис. 6в приведены мгновенные вертикальные профили температуры морской воды в б. Мамала для 3-х моментов времени в период с 3 по 4 сентября 2002 г., которые свидетельствуют о значительных изменениях стратификации за этот период.

На рис. 7 приведены временные зависимости высоты всплыивания и начального разбавления струи за период с 1 по 6 сентября 2002 г. Как видно из рисунка, в первые двое с половиной суток наблюдений типичные значения высоты всплыния  $z$  и начального разбавления  $D$  струи были в пределах  $z = -(42\text{--}32)$  м,  $D = 150\text{--}250$ .

После этого, вследствие усиления амплитуды вертикальных колебаний термоклина и его заглубления, нижние значения высоты всплыния и начального разбавления струи понизились до величин  $z_{\min} = -50$  м и  $D_{\min} = 100$ , а максимальные значения высоты всплыния и разбавления повысились до  $z_{\max} = 0$  м (поверхность) и  $D_{\max} = 960$ .

Анализ данных, приведенных на рис. 7, показывает, что в период наблюдений с 1 по 6 сентября 2002 г. температурная стратификация вблизи глубоководного сброса изменялась в больших пределах, временами достигая малых значений. При этих условиях ( $\sim 15\%$  случаев) сильно разбавленные (в 600–1000 раз) сбрасываемые воды достигали поверхности (рис. 7).

## 5. СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ОЦЕНОК ПАРАМЕТРОВ СТРУИ С ДАННЫМИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Как уже отмечалось ранее, при проведении комплексных экспериментов в б. Мамала с помо-

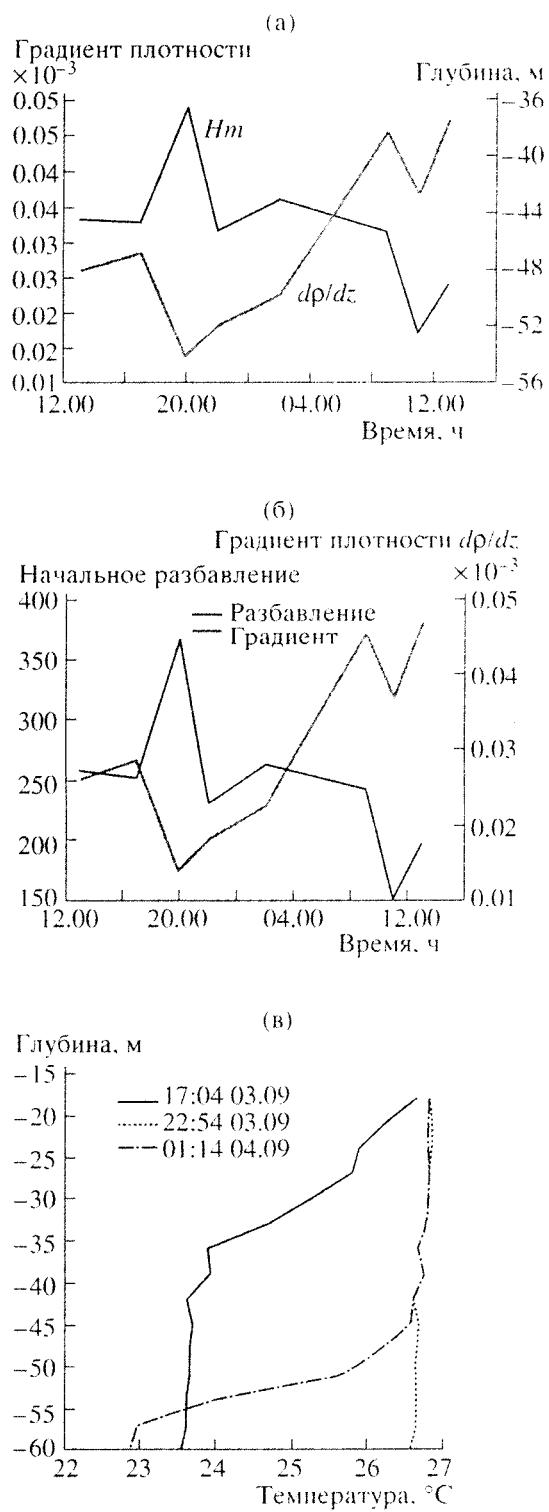


Рис. 6. Сопоставление параметров распространения струи с характеристиками стратификации среды. (а) – изменения во времени уровня подъема струи  $H_m$  и градиента плотности  $d\rho/dz$ ; (б) – изменения во времени начального разбавления сточных вод и градиента плотности  $d\rho/dz$ ; (в) – вертикальные профили температуры воды в б. Мамала для 3-х моментов времени в период с 3 по 4.09.2002 г.

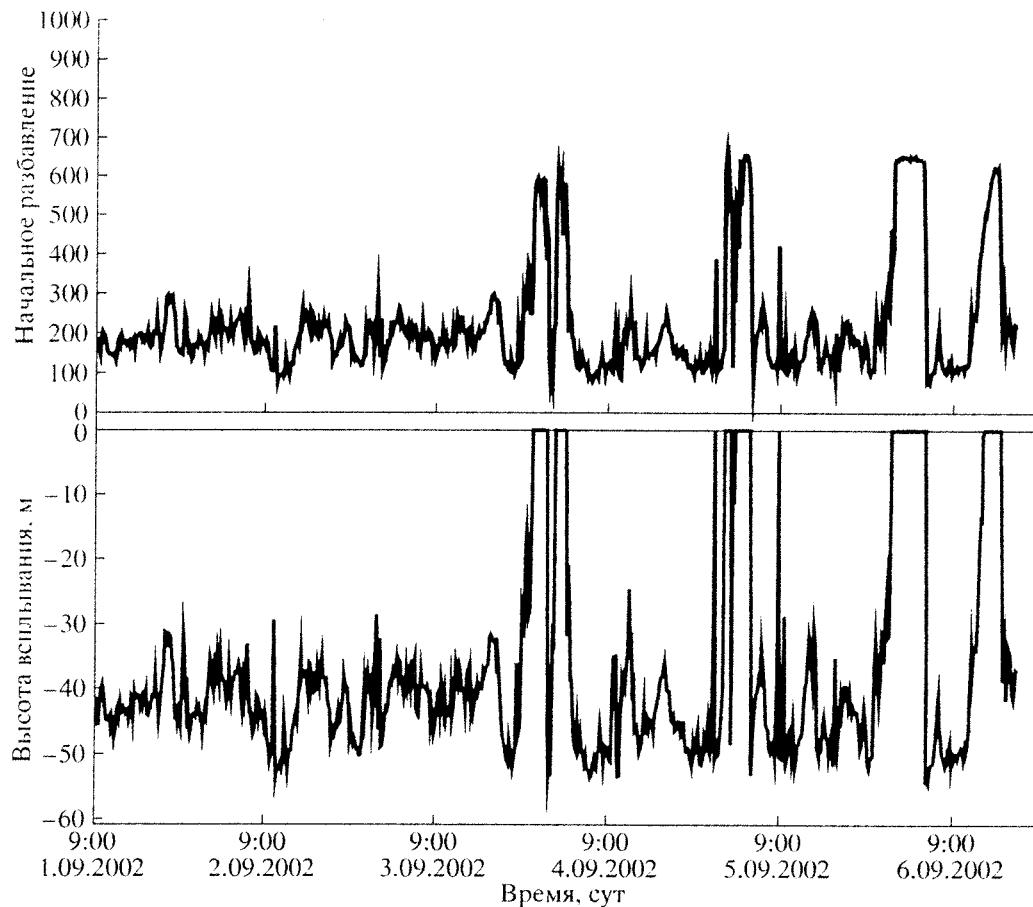


Рис. 7. Модельные оценки высоты всплытия и начального разбавления в период 1–6.09. 2002 г.

щью стационарных буйковых станций, а также измерений с борта судов, в том числе с помощью микроструктурных зондов, определялись гидрофизические, оптические, биологические и химические параметры среды [14, 15, 17, 19, 20]. По результатам этих натурных измерений определялись параметры распространения струй: горизонты всплытия сбрасываемой воды, направление и скорость распространения, концентрация загрязняющих веществ на различных глубинах и расстояниях от диффузора.

Сопоставление параметров глубинных стоков, полученных на основе экспериментальных измерений, с результатами модельных расчетов позволяет оценить адекватность используемой математической модели, а также точность и надежность получаемых модельных оценок.

По результатам измерений, выполненных с помощью опускаемых и буксируемых микроструктурных зондов, были построены пространственно-временные распределения различных характеристик морской воды (см. рис. 8а–8б). На этом рисунке приведены профили вертикальных распределений мутности (а), солености (б), темпе-

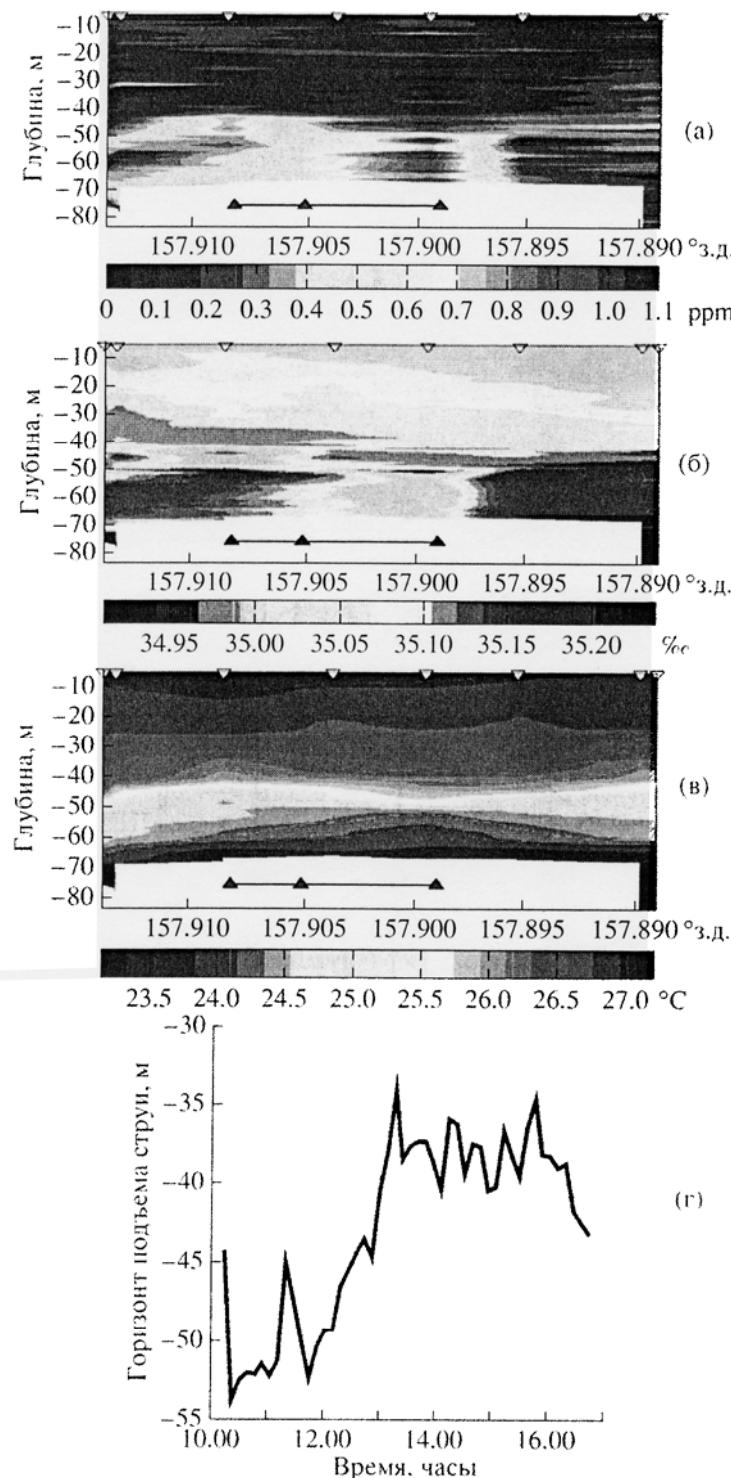
ратуры (в) морской воды, построенные по результатам микроструктурных измерений вблизи диффузора в период с 12 ч 15 мин до 15 ч 20 мин 2 сентября 2002 г. [14, 17, 19, 20].

Из этих профилей четко видно, что в анализируемый период времени сбрасываемые воды поднимались до горизонта 45 м.

На рис. 8г приведены уровни подъема струи вод, рассчитанные с помощью предложенной модели для периода времени с 9.00 ч до 16.00 ч 2 сентября 2002 г. Как видно из рисунка, для интервала времени с 12.00 ч до 16.00 ч модельные оценки средний уровень подъема струи составляют ~44 м, что находится в хорошем соответствии с данными экспериментальных измерений (~45 м).

Результаты обработки данных гидробиологических измерений показали, что за весь период наблюдения сбрасываемые воды находились на глубинах в среднем выше 40–50 м. Эти усредненные данные также хорошо согласуются с результатами модельных расчетов, приведенными на рис. 8г.

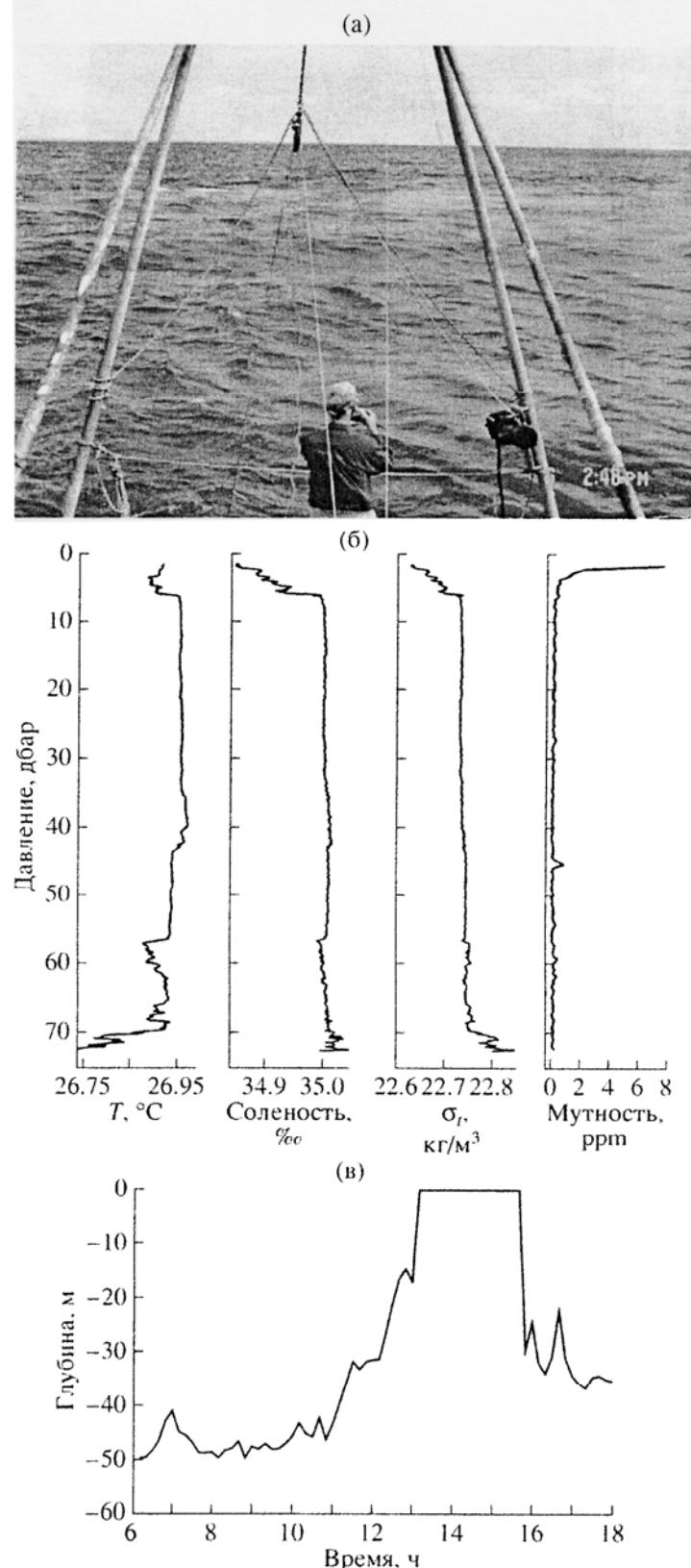
Во время проведения экспериментов с борта исследовательского судна 6 сентября 2002 г. вбли-



**Рис. 8.** Сравнение модельных оценок параметров струи с данными экспериментальных измерений. (а) – вертикальные профили мутности, солености (б), температуры (в) по измерениям зондом MSS 2.09.2002 г. в период с 14 ч 15 мин до 15 ч 20 мин; (б) модельные оценки глубины всплытия струи сточных вод в период с 9.00 до 17.00 2.09.2002 г.

зи диффузора было замечено аномальное пятно на морской поверхности. На рис. 9а приведена фотография этой поверхностной аномалии, сня-

тая в 14 ч 48 мин профессором К. Гибсоном. Аномальное пятно, вызванное всплытием сбрасываемых вод, выделялось на морской поверхности по



**Рис. 9.** Сравнение модельных оценок параметров струи с данными экспериментальных измерений 6.09.2002 г. (а) – фотография поверхности аномалии, вызванной глубоководным стоком, снятая с борта судна вблизи диффузора 6.09.2002 г. в 14 ч 48 мин; (б) – вертикальные профили температуры, солености, плотности, мутности, измеренные микроструктурным зондом 6.09.2002 г. в центре аномального пятна (рис. 9а); (в) – модельные оценки глубины всплыивания струи сбрасываемых вод в период с 6 ч до 18 ч 6.09.2002 г.

цвету и структуре поверхностного волнения. На границах пятна наблюдались барашки волн. Диаметр пятна составлял ~80 м.

С помощью микроструктурного зонда, опущенного с борта судна в центре пятна, были измерены вертикальные профили температуры, солености, плотности и мутности, которые представлены на рис. 9б [18]. Из приведенных профилей видно, что всплывшие сбрасываемые воды располагались в поверхностном слое толщиной ~6 м.

Результаты модельных оценок горизонтов подъема сбрасываемых вод для 6 сентября 2002 г. в период с 6 ч до 18 ч (время местное) представлены на рис. 9в. Видно, что по данным используемой модели сбрасываемые воды всплывали на поверхность в период времени с 13 ч до 15 ч, что хорошо согласуется с данными экспериментальных наблюдений.

Хорошее соответствие модельных оценок характеристик распространения сбрасываемых вод с результатами экспериментальных измерений свидетельствуют об адекватном описании применяемой математической моделью механизма распространения глубинных турбулентных струй.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развита теория распространения турбулентных струй сбрасываемых вод в стратифицированной среде, на основе которой разработана компьютерная модель, позволяющая рассчитывать горизонты всплыивания и величины разбавления струй, а также оценивать толщины слоев распространения струй.

Проведен анализ возможностей методов математического моделирования для исследования характеристик глубинных стоков в прибрежные акватории.

С помощью разработанной математической модели проведены оценки параметров всплывающей струи для глубоководногоброса с о. Санд в акваторию б. Мамала (Гавайские о-ва) при различных вариантахброса и в разные сезоны года.

По результатам модельных расчетов, выполненных с использованием экспериментально измеренных профилей температуры и солености, получены оценки горизонтов всплыивания и начального разбавления струи в стратифицированной среде. Показано, что стратификация в б. Мамала в исследуемый период времени была подвержена значительным колебаниям под действием приливо-отливных течений и вызванных ими внутренних волн. Вертикальные колебания термоклина под действием приливов были столь велики, что даже в летний период при устойчивой стратификации сточные воды временами (15% случаев) достигали поверхностного слоя.

Приведенные сравнения модельных оценок характеристик распространения струи сбрасываемых вод с данными экспериментальных измерений показали хорошее соответствие, что свидетельствуют об адекватном описании применяемой математической моделью механизма распространения глубоководных сбросов.

Проведенные результаты математического моделирования распространения струй сбрасываемых вод в морской среде демонстрируют эффективность применения предложенной модели для исследования заглубленных стоков в прибрежных акваториях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии. Новые идеи в океанологии. Т1: Физика. Химия. Биология. М.: Наука. 2004. С. 55–117.
- Бондур В.Г. Принципы построения космической системы мониторинга Земли в экологических природно-ресурсных целях// Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1995. № 1–2. С. 14–27.
- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В. Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исслед. Земли из космоса. 2001. № 6. С. 59–73.
- Бондур В.Г., Зубков Е.В. Лидарные методы дистанционного зондирования загрязнений верхнего слоя океана // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. № 2. С. 142–155.
- Бондур В.Г., Зубков Е.В. Выделение мелкомасштабных неоднородностей оптических характеристик верхнего слоя океана по многоспектральным спутниковым изображениям высокого разрешения. Ч. 1. Эффектыброса дренажных каналов в прибрежные акватории // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 4. С. 54–61.
- Верболов В.И., Журбас В.М., Мамедов Р.М., Озмидов Р.В. Распространение затопленной струи примесей в прибрежной зоне // Течения на Байкале. Новосибирск: Наука. 1997. С. 143–149.
- Виноградов М.Е. Роль океана в жизни и сохранении биосфера Земли // Глобальные экологические проблемы на пороге XXI века. М.: Наука, 1998. С. 99–118.
- Виноградов М.Е., Шукинина Э.А. Функционирование планктонных сообществ эпипелагиали океана. М.: Наука, 1987. 240с.
- Владимиров А.М., Ляхин Ю.П., Матвеев Л.Т., Орлов В.Г. Охрана окружающей среды. Л: Гидрометеоиздат, 1991. 424 с.
- Долотов Ю.С. Проблемы рационального использования и охраны прибрежных областей Мирового океана. М: Научный мир, 1996. 304 с.
- Журбас В.М. Траектории турбулентных струй примеси в устойчиво стратифицированной среде // Водные ресурсы. 1977. № 4. С. 165–172.
- Израэль Ю.А., Цыбань А.В. Антропогенная экология океана. М.: Гидрометеоиздат, 1989. 528 с.

13. Озмидов Р.В. Диффузия примесей в океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 280 с.
14. Bondur V.G. Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas // Proc. of 31 Int. Symp. on Remote Sensing of Environment. St.Petersburg, 2005.
15. Bondur V.G., Filatov N. N. Study of physical processes in coastal zone for detecting anthropogenic impact by means of remote sensing // Proceeding of the 7 Workshop on Physical processes in natural waters, 2–5 July 2003. Petrozavodsk, Russia. P. 98–103.
16. Bondur V., Starchenkov S. Monitoring of Anthropogenic Influence on Water Areas of Hawaiian Islands Using RADARSAT and ENVISAT Radar Imagery // Proc. of 31 Int. Symp. on Remote Sensing of Environment. St.Petersburg, 2005.
17. Bondur V., Tsidilina M. Features of Formation of Remote Sensing and Sea truth Databases for The Monitor-
- ing of Anthropogenic Impact on Ecosystems of Coastal Water Areas // Proc. of 31 Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, St.Petersburg, 2005.
18. Fisher H.B., List E.J., Koh R.C.Y. et al. Mixing in Inland and Coastal Waters. Academic Press, 1979. 484 p.
19. Keeler R., Bondur V., Vithanage D. Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // Sea Technology. April, 2004. P. 53–58.
20. Keeler R., Bondur V., Gibson C. Optical satellite imagery detection of internal wave effects from a submerged turbulent outfall in the stratified ocean // Geophysical Research Letters. V. 32. L12610. doi:10.1029/2005GL022390. 2005.
21. Petrenko A.A., Jones B.H., Dickey T.D. et al. 1997. Effects of a sewage plume on the biology, optical characteristics and particle size distributions of coastal waters // J. Geophys. Res. V. 102, № C11. P. 25061–25071.

## Mathematical Modeling of Turbulent Jets of Deep Outfalls in Coastal Water Areas

**V. G. Bondur, V. M. Zhurbas, Yu. V. Grebenuk**

Turbulent jet dynamics model fundamentals are considered for deep outfalls in the stratified environment of coastal water areas. The worked out model was used to evaluate the emerging jet characteristics for the Sand Island wastewater outfall in Mamala Bay (Hawaii) depending on a season and the outfall operation mode. Horizon of the jet's emergence and initial dilution were estimated on the basis of model calculations using experimental data on vertical profiles of the water temperature and salinity experimental data constructed from sea truth measurements in stratified ocean. It is shown that further propagation of wastewater jet depends on tidal events as well as produced internal waves. Facts of the appearance of the turbulent jets on the sea surface were captured. The computer modeling characteristics correspond with experimental measurements. This is the evidence of the adequate model for physical mechanisms of turbulent jet propagation through stratified ocean.