

УДК 551.465.551.468

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ СРЕДЕ ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЙ

© 2009 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

e-mail: vgbondur@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 20.06.2008 г.

Приводятся результаты модельных расчетов и экспериментальных исследований распространения турбулентной струи в стратифицированной среде, применительно к глубоководному сбросу с о. Санд (Гавайские о-ва). На основании расчетов, выполненных с использованием математической модели и экспериментальных данных о характеристиках стратификации среды в 2003–2004 гг., определены высоты всплыния и начальное разбавление струи. Проведен анализ TS-индексов и объяснена причина возникновения “двуухлестковой” квазизопицнической структуры в области смешения сбрасываемой и соленой океанской воды. Расчетные параметры струи сопоставлены с результатами измерений, выполненных с помощью гидрофизической и гидрооптической аппаратуры, и получено хорошее соответствие модельных и экспериментальных данных. Выявлено существенное влияние гидрофизических условий и приливного режима на характеристики турбулентной струи (прежде всего, горизонт всплыния) сбрасываемых вод. Полученные результаты подтверждают эффективность применения предложенной модели для исследования распространения турбулентных струй заглубленных стоков в стратифицированной среде прибрежных акваторий.

### ВВЕДЕНИЕ

Как известно, прибрежные акватории морей и океанов испытывают интенсивные антропогенные воздействия, одним из наиболее сильных среди которых являются сбросы отработанных загрязненных вод [1, 2, 9, 10]. Глубинные стоки оказывают существенное воздействие на водную среду за счет широкого спектра присущих им процессов и явлений [1, 2, 4, 8, 11].

В работе [4] проведено подробное рассмотрение математической модели, описывающей распространения в стратифицированной среде турбулентных струй сбрасываемых вод, а также методических аспектов проведения численных расчетов, которые использованы при моделировании характеристик всплывающей струи для действующего сбросового устройства на о. Санд (Гавайские о-ва). В этом регионе Тихого океана в 2002–2004 гг. в рамках международного проекта проводились комплексные исследования антропогенных воздействий глубоководного сброса на экосистему прибрежной акватории б. Мамала. При проведении этих исследований выполнялась съемка исследуемой акватории с борта различных космических аппаратов, а также подспутниковые измерения гидрофизических, биологических, химических и гидрооптических характеристик среды [1, 3, 5–7, 12–15, 17, 18, 21]. Результаты контактных измерений использовались в качестве входных данных для выполнения модельных расче-

тов, а также для сопоставления с результатами математического моделирования. На основании проведенных модельных расчетов в работе [4] получены оценки горизонтов всплыния и начального разбавления турбулентных струй для условий стратификации среды, наблюдавшихся в период с 1 по 6 сентября 2002 г. в акватории б. Мамала. Сравнение модельных оценок характеристик распространения турбулентных струй сбрасываемых вод с данными экспериментальных измерений показало их хорошее соответствие, что свидетельствует об адекватном описании применяемой математической моделью механизмов распространения глубоководных сбросов [4].

В результате комплексных исследований антропогенных воздействий глубоководного сброса с о. Санд на экосистему б. Мамала, проведенных в августе–сентябре 2003 и 2004 гг. [3, 5–7, 12, 14, 15, 21] получен большой объем экспериментальных данных, который совместно с результатами моделирования позволяет провести более детальный и глубокий анализ характеристик распространения сбрасываемых вод в этом регионе в зависимости от изменяющихся гидрофизических и метеорологических условий. В настоящей работе приводятся результаты модельных оценок параметров распространения турбулентных струй сбрасываемых вод в акваторию б. Мамала в различных гидрологических условиях в августе–сентябре 2003–2004 гг.,

а также их сопоставление с результатами гидрофизических и гидрооптических измерений, позволяющее провести верификацию предложенной математической модели.

### ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВСПЛЫВАЮЩЕЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ

Для исследования характеристик распространения турбулентных струй загрязненных вод, сбрасываемых в акваторию б. Мамала по заглубленному трубопроводу, использовалась математическая модель, позволяющая получить оценки глубины всплыивания и величины разбавления сбрасываемых вод в стратифицированной среде [4]. Особенности используемой модели заключались в следующем. Распространение струи описывалось системой из семи обыкновенных дифференциальных нелинейных уравнений, характеризующих баланс горизонтального и вертикального компонентов импульса, расход тепла, соленость и координаты струи, которая дополнялась уравнением состояния морской воды. Эти уравнения были получены путем интегрирования уравнений движения, неразрывности, баланса тепла и соли при допущении об автомодельности распределений скорости, температуры и солености в поперечном сечении струи [4].

При выводе уравнений рассматривалась турбулентная струя, которая на некоторой глубине  $z$  впрыскивалась в среду под углом  $\Theta_0$  к горизонту в плоскости  $xz$ . Среда считалась несжимаемой и неподвижной, ее плотность  $\rho_a(z)$  зависит от вертикальной координаты, причем  $d\rho_a/dz < 0$ , то есть среда устойчиво стратифицирована. Полагалось, что плотность струи  $\rho(z)$  на горизонте  $z$  меньше плотности среды, так что струя являлась всплывающей. Вводились следующие обозначения:  $s$  – координата вдоль оси струи,  $r$  – радиальная координата,  $u(s)$  и  $\rho(s)$  – скорость и плотность на оси струи,  $\rho_0 = \rho_a(0)$  – отсчетная плотность,  $b = b(s)$  – характеристическая полуширина струи,  $\lambda = 1.16$  – константа. Система уравнений принимала вид [4]:

$$\frac{d}{ds}(ub^2) = 2\alpha ub, \quad (1)$$

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

$$\frac{d}{ds}(u^2b^2 \sin \Theta) = 2g\lambda^2 b^2 \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_0}, \quad (3)$$

$$\frac{d}{ds}[ub^2(T_a - T)] = \frac{1 + \lambda^2}{\lambda^2} b^2 u \frac{dS_a}{ds}, \quad (4)$$

$$\frac{d}{ds}[ub^2(S_a - S)] = \frac{1 + \lambda^2}{\lambda^2} b^2 u \frac{dS_a}{ds}, \quad (5)$$

$$\frac{dx}{ds} = \cos \Theta, \quad (6)$$

$$\frac{dz}{ds} = \sin \Theta, \quad (7)$$

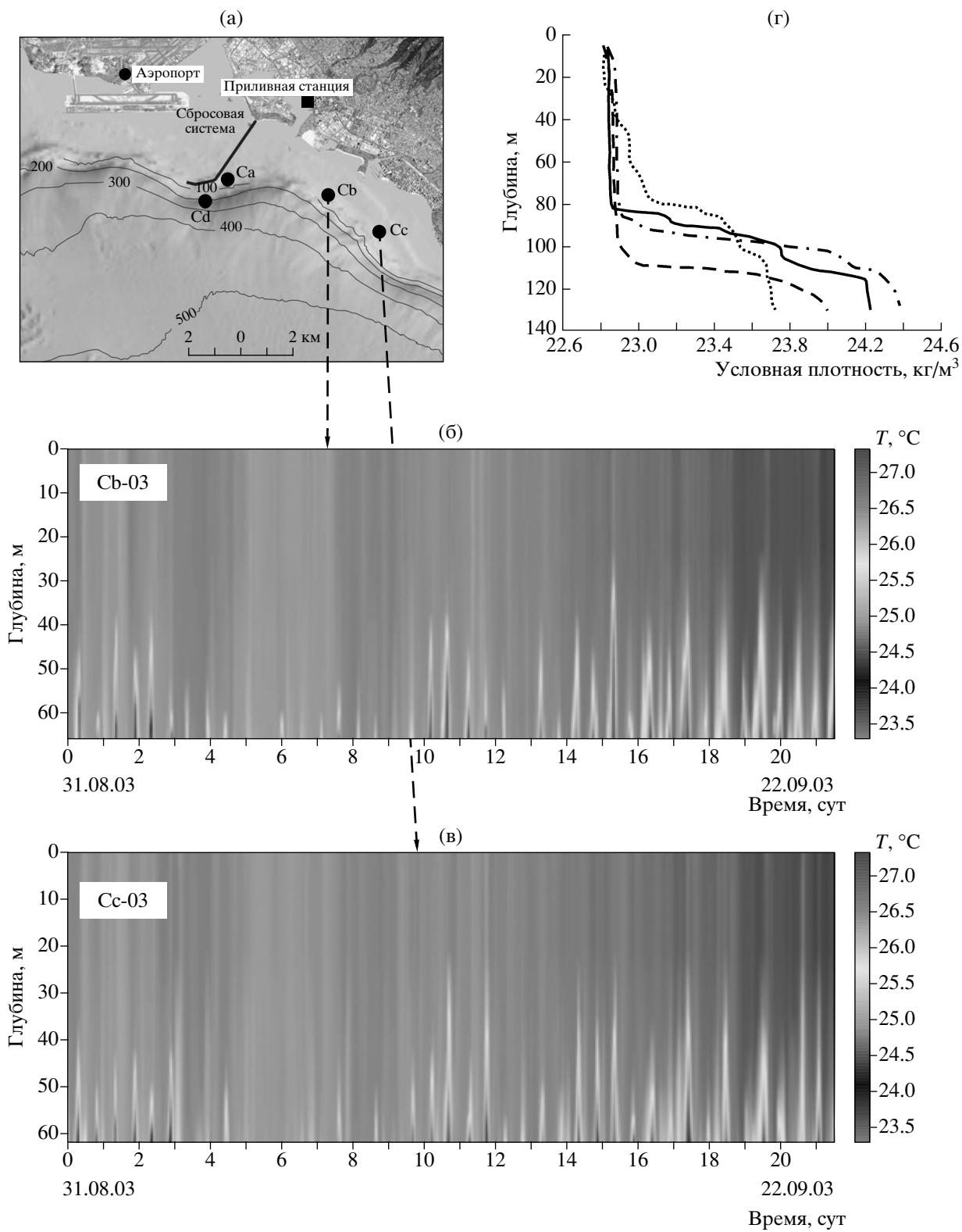
$$\rho = \rho(T, S), \quad (8)$$

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

Так как в прибрежную акваторию сбрасывается пресная вода, содержащая различные примеси, то ее начальная плотность, как правило, меньше плотности окружающей морской воды, и струя является всплывающей [2, 4]. На активной фазе распространения струи под действием силы Архимеда происходит ее всплыивание [2, 4]. К концу активной фазы всплыивание струи прекращается, и ее дальнейшее распространение происходит примерно на одном горизонте. Струя совершает лишь затухающие колебания относительно того горизонта, на котором она оказалась в конце активной фазы. Дальнейшее распространение струи в среде происходит под действием турбулентной диффузии и течений, существующих в прибрежной зоне [2, 4]. С использованием этой математической модели можно рассчитывать глубину всплыивания и толщину слоя распространения струи (масштаб Озмидова [11]) в стратифицированной среде, начальное разбавление и другие характеристики. Подробное описание модели дано в работе [4].

Математическая модель распространения турбулентной струи в стратифицированной среде реализована в виде компьютерной программы. С помощью этой программы проводились расчеты характеристик всплывающей струи применительно к условиям, сложившимся в акватории б. Мамала в августе–сентябре 2002–2004 гг. Расположение глубоководного трубопровода в б. Мамала приведено на рис. 1а. При проведении модельных расчетов использовались следующие параметры сбросовой системы на о. Санд [16]: общий средний расход  $Q = 4.64 \text{ м}^3/\text{s}$ ; средний расход из единичного отверстия диффузора  $Q_0 = 0.0163 \text{ м}^3/\text{s}$ ; скорость истечения воды из отверстий диффузора  $U_0 = 3 \text{ м}/\text{s}$ ; глубина расположения диффузора  $H = 70 \text{ м}$ ; температура сбрасываемых вод  $T_C = 25\text{--}27.5^\circ\text{C}$ . Считалось, что сбрасывается пресная вода.

Для моделирования использовались данные о стратификации среды, полученные по результатам гидрофизических измерений [5, 14, 15, 21]. Следует отметить, что в бухте существуют достаточно сильные приливо-отливные течения, оказывающие большое влияние на различные гидрофизические



**Рис. 1.** Схема расположения заякоренных термисторных станций в акватории б. Мамала (а); примеры распределений температуры морской воды (в координатах время-глубина) по данным измерений на станциях Сb (б) и Сc (в) в период с 31.08 по 22.09.2003 г.; типичные вертикальные профили плотности для исследуемой акватории в сентябре 2003 г., полученные СТД-изменениями ст. Cd (г).

процессы, в том числе и на распространение турбулентных струй сбрасываемых вод [3, 5, 13, 19, 20].

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРЕННЫХ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

При проведении численных расчетов использовались вертикальные профили плотности, полученные по результатам измерений температуры и электропроводности на 4-х заякоренных термисторных станциях (термокосах) в акватории бухты Мамала – Са, Св, Сс, Cd, схема расположения которых приведена на рис. 1а [5, 12, 14]. Станции Са, Св и Сс, располагались вдоль изобаты 70 м. При проведении натурных экспериментов в 2003 г. измерения на станции Са, расположенной вблизи диффузора, проводились в период с 27 августа по 22 сентября в диапазоне глубин 3.5–45.5 м с временной дискретностью 5 мин. Время измерений везде указывается местное. Станции Св, Сс располагались восточнее диффузора на расстоянии ~3 и 6 км от него. Измерения на этих станциях проводились с 31 августа по 22 сентября 2003 г. в диапазоне глубин 20–66 м с дискретностью 2 мин. Эти данные экстраполировались до глубины 70 м.

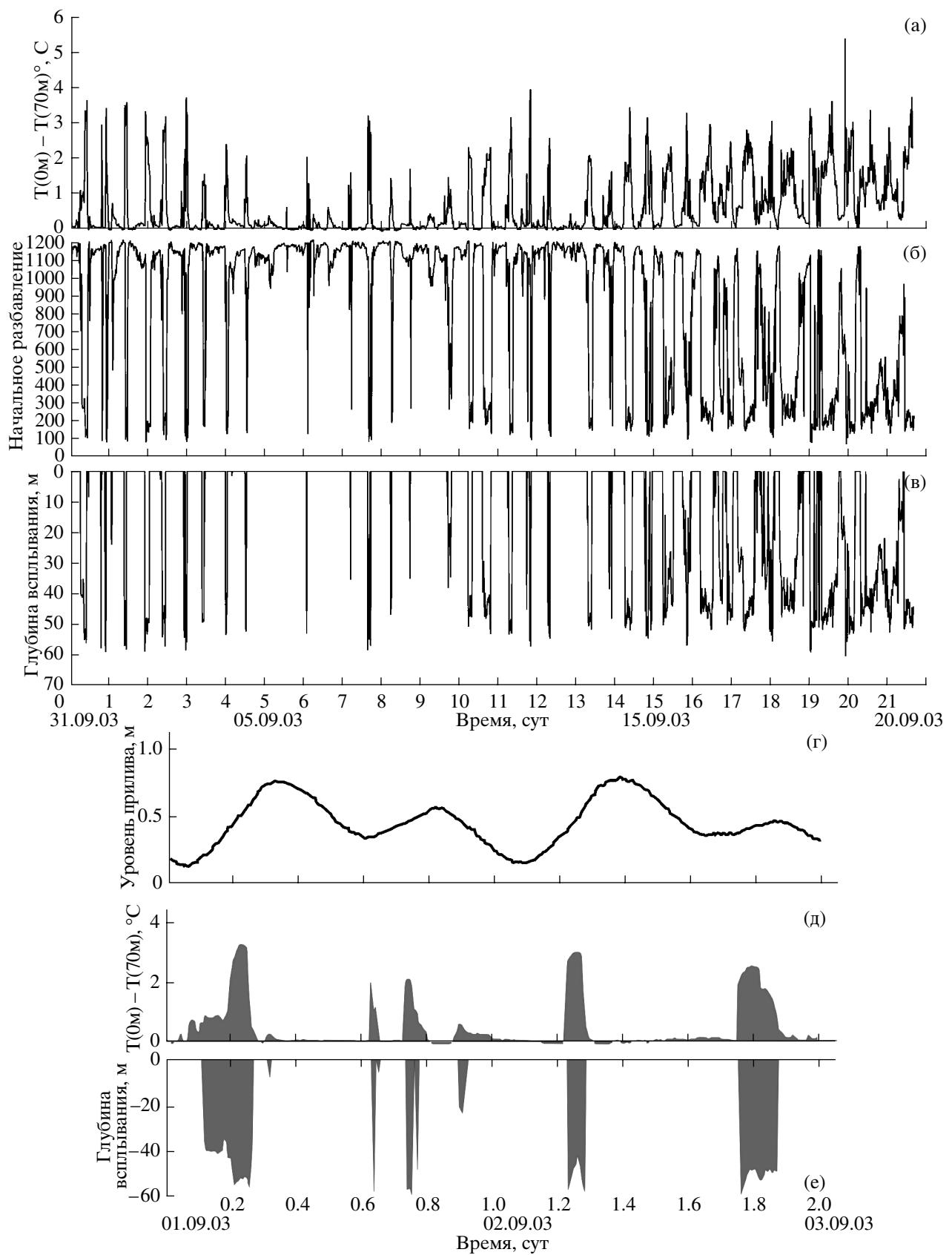
На станции Cd, расположенной примерно на расстоянии 1 км к югу от диффузора, где глубина моря превышала 170 м, измерения выполнялись в период с 23 августа по 7 сентября 2004 г. Измерительные датчики этой станции располагались на глубинах 17–68 м. Измерения на станции Са в 2004 г. проводились в период с 14 августа по 07 сентября в диапазоне глубин 20–80 м. Дискретность отсчетов на всех измерительных станциях, в том числе Са и Cd, при проведении натурных экспериментов в 2004 г. составляла 30 с [6, 14].

При расчетах параметров распространения турбулентной струи сбрасываемых вод в период проведения натурных экспериментов в 2004 г. использовались данные измерений термокосами на двух заякоренных станциях Са, Cd, расположенных вблизи диффузора (см. рис. 1а), а также результаты измерений с борта корабля микроструктурными и CTD зондами [6, 12, 14, 15, 21]. На рис. 1б и 1в в качестве примеров представлены распределения температуры по глубине в акватории б. Мамала по данным измерений на станциях Св (б) и Сс (в) в период с 31 августа по 22 сентября 2003 г. Анализ результатов длительных измерений температуры воды в б. Мамала на станциях Са, Св, Сс показал, что температурный режим, существовавший в сентябре 2003 г., значительно отличался от условий 2002 г., когда наблюдалось существенное изменение температуры воды по глубине и сильная стратификация [4, 6]. Из представленных рисунков видно, что в приповерхностном слое океана 0–60 м для станций Св, Сс (см. рис. 1б и 1в) и 0–50 м для станции Са температура воды в течение большей части времени измерений изменя-

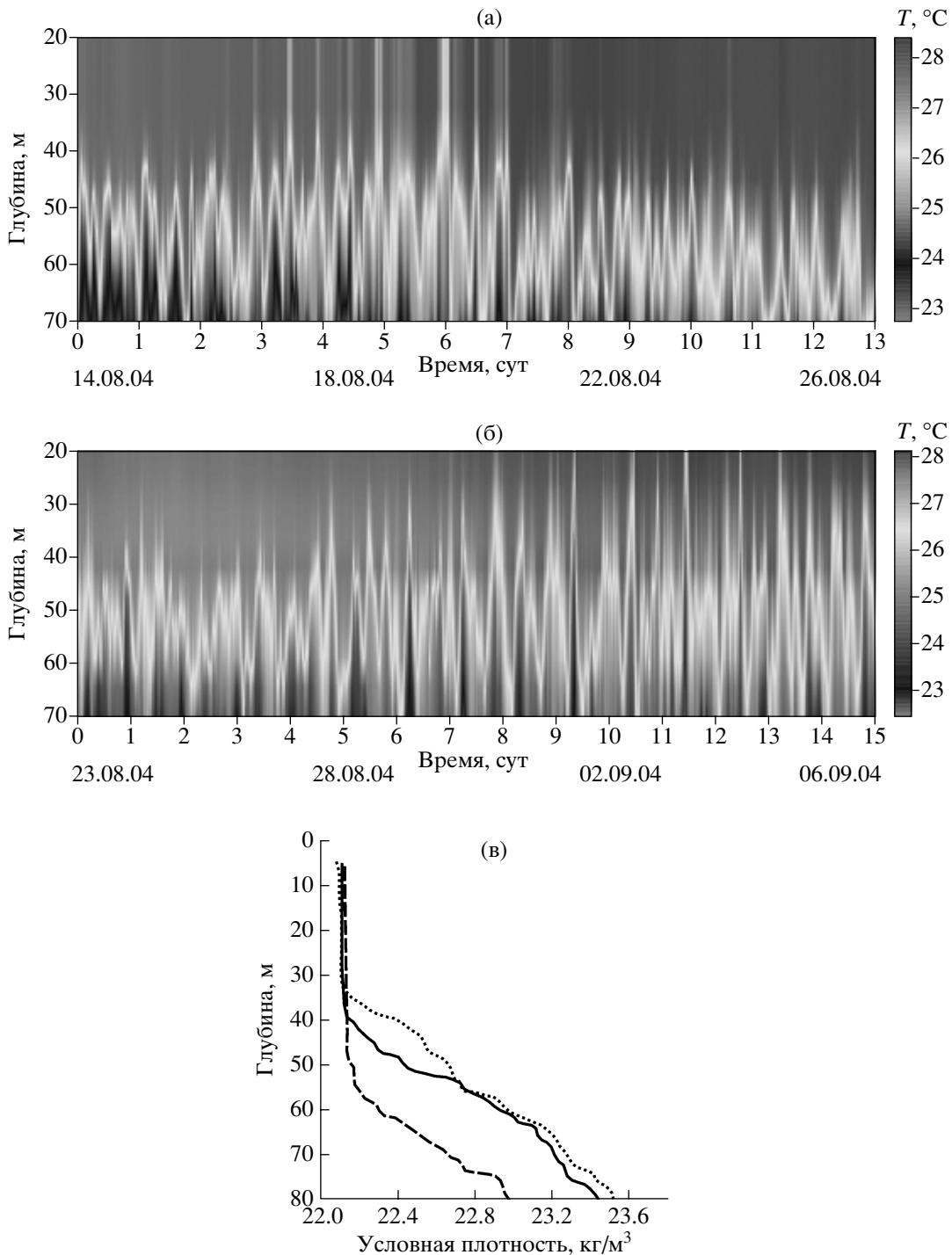
лась незначительно:  $26 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . Вся толща воды на этих глубинах находилась в пределах хорошо перемешанного верхнего квазиоднородного слоя. Значительную часть времени измерений пикноклин находился на глубинах более 80 м, о чем свидетельствуют данные CTD-измерений, полученные в районах южнее станций Td (рис. 1г), то есть ниже глубины расположения диффузора [6]. В связи с этим, слабый и расположенный глубже диффузора слой скачка плотности в районе диффузора (см. рис. 1г) не мог создавать препятствий для всплытия турбулентной струи сбрасываемых вод к поверхности. Таким образом, в период проведения экспериментов в 2003 г. стратификация в слое воды над диффузором была существенно ослаблена: перепад температуры в слое был, чаще всего, меньше  $0.5^{\circ}\text{C}$ . Исключение составляли лишь кратковременные промежутки увеличения перепада температуры, связанные с внутренним полусуточным приливом (см. рис. 1б и 1в) [6].

Для расчета всплытия и начального разбавления струи необходимо знание вертикального распределения плотности в слое морской воды над диффузором. Начальное разбавление струи определяется отношением расхода струи на глубине всплытия к расходу на глубине расположения диффузора. Для вычисления параметров струи обычно используются вертикальные профили температуры и соленоности. На термисторных станциях использовались датчики типа “Star – Oddi CTD” [14, 17], позволявшие измерять температуру и электропроводность морской воды. Но анализ данных электропроводности, полученных этими датчиками в 2003 г. показал, что они давали неправильные значения. В связи с этим, на них использовались профили температуры и электропроводности, измеренные в акватории бухты Мамала другими датчиками – микроструктурными (MSS) и CTD зондами [5, 12–15, 17, 21]. На рис. 2а, 2б и 2в приведены результаты расчетов разности температуры:  $T[0 \text{ м}] - T[70 \text{ м}]$  между верхним и нижним слоями воды (а), начального разбавления (б) и глубины всплытия струи (в) для условий, соответствующих месту расположения ст. Са с 31 августа по 20 сентября 2003 г. Модельные расчеты параметров струи показали, что струя сбрасываемых вод часто достигала поверхности моря (см. рис. 2в), а начальное разбавление при этом достигало величины  $>1000$  (см. рис. 2б). В последнюю четверть периода проведения экспериментов 2003 г. (после 14 сентября) перепад температуры в слое (0–70 м) несколько увеличился (см. рис. 2а) и всплытие струи до поверхности стало более редким (см. рис. 3в).

На рис. 2г–2е представлены графики изменения уровня океана (г), более детальные графики временных изменений перепада температуры между верхним и нижним горизонтами измерений (д) и глубины всплытия струи (е) в период времени с 1 по 3 сентября 2003 г. (увеличенные фрагменты рис. 2а и 2в)



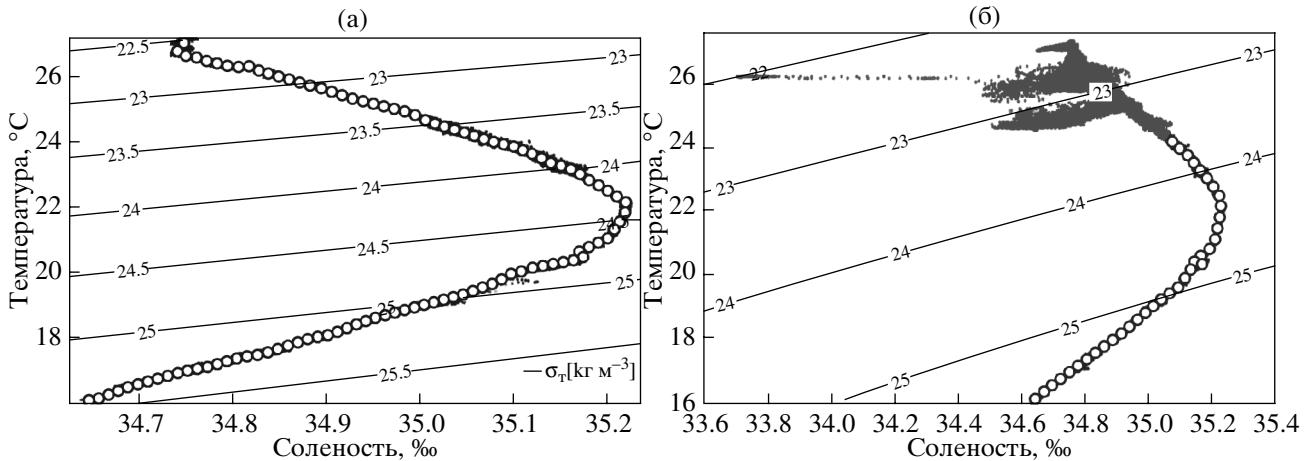
**Рис. 2.** Временные вариации перепада температуры между верхним (0 м) и нижним (~70 м) слоями воды (а), начального разбавления (б) и глубины всплыивания струи (в) на ст. Са в период с 31.08 по 20.09.2003 г. Увеличенные фрагменты графиков для уровня океана (г), перепада температуры (д) и глубины всплыивания струи (е) для 1–3.09.2003 г.



**Рис. 3.** Распределение температуры морской воды в акватории б. Мамала в координатах глубина-время по данным измерений в 2004 г. на станциях: (а) – Са (с 14 по 26.08.2004 г.); (б) – Cd (с 23.08 по 06.09.2004 г.); (в) – профили плотности вблизи ст. Cd, измеренные микроструктурным зондом 03.09.2004 г.

для условий, соответствующих месту расположения станций Са. Анализ данных, представленных на этих рисунках, позволяет установить временную зависимость между изменениями уровня океана под действием приливов и параметрами распространения струи. Из графиков, приведенных на рис. 2г–2е

видно, что в фазу прилива поступающие с больших глубин холодные воды вызывают значительное увеличение разности температур между верхними и нижними слоями, вследствие чего существенно снижается уровень подъема струи. В фазу отлива происходит выравнивание температуры воды в верхних



**Рис. 4.** TS-диаграммы, полученные по результатам измерений MSS-зондом в области фоновой термохалинной стратификации южнее ст. Сс (светлые точки) (а) и в районе ст. Cd (темные точки) (б) в области смешения океанской воды со сбрасываемыми пресными водами.

и нижних слоях, что приводит к подъему сбрасываемых вод ближе к поверхности.

Приведенные данные свидетельствуют о сильном влиянии приливных течений на характеристики распространение струй сбрасываемых вод в б. Мамала. Такая ситуация была характерна для сезона измерений (август–сентябрь). В иные сезоны (например, весной) нижняя граница ВКС может располагаться существенно выше горизонта диффузора и, следовательно, эффект прилива на высоту всплыния струи будет ослаблен.

На рис. 3 приведены распределения температуры в августе–сентябре 2004 г. в координатах время – глубина по данным измерений на станциях Са (с 14 по 28 августа 2004 г.) – рис. 3а; Cd (с 23 августа по 6 сентября 2004 г.) – рис. 3б. Разрезы построены для верхнего слоя океана в диапазоне глубин (0–70 м) над диффузором. На основании анализа распределений, приведенных на рис. 3а и 3б, установлено, что временные вариации температуры характеризовались интенсивной изменчивостью, вызванной внутренними волнами, причем с явным доминированием приливных колебаний с полусуточным периодом. Эта особенность выявлена также в работах [3, 6, 9]. В районе станции Са амплитуда внутренней приливной волны иногда становилась настолько большой (см. рис. 4а), что в подошве волны верхний квазиоднородный слой занимает практически всю 70-метровую толщу. Так как станция Cd располагалась в точке, где глубина была значительно больше (более 170 м), чем в районе станции Са (~70 м), то можно предположить, что усиление амплитуды внутреннего прилива на станции Са по сравнению со станцией Cd связано с уменьшением глубины моря до величины, незначительно превышающей невозмущенную толщину ВКС. Этот эффект аналогичен усилию поверхностных волн на мелководье при приближении к берегу.

Учитывая ошибки измерений электропроводности с помощью термисторных станций, для определения солености использовался метод TS-диаграмм. При этом было сделано предположение, что изменчивость термохалинных полей в районе диффузора удовлетворяет некой неизменной TS-диаграмме. Если TS-диаграмма известна, то ее можно использовать для нахождения значений солености по измеренным термокосой значениям температуры, а затем рассчитать вертикальные профили плотности. На рис. 4а и 4б в качестве примеров представлены TS-диаграммы, полученные по данным измерений, выполненных микроструктурным зондом в акватории б. Мамала [14, 15, 21]. Рис. 4а относится к станции Сс (см. рис. 1а), установленной вдали от диффузора, и соответствует фоновой термохалинной стратификации, не возмущенной струей сбрасываемых вод. Рис. 4б построен по данным микроструктурных измерений в районе диффузора (станция Cd) и соответствует TS-индексам смеси соленой океанской воды со сбрасываемыми пресными водами. Светлые точки на TS-диаграммах соответствуют фоновой термохалинной стратификации, а темные точки – смеси океанской воды со сбрасываемыми пресными водами. Как видно из рис. 4а, не возмущенные сбрасываемыми водами TS-индексы с незначительным разбросом ложатся на некую кривую.

Таким образом, по этим кривым для каждого заданного значения температуры можно определить соответствующее значение солености. Расчет солености в районе расположения термисторных станций проводился по следующей схеме. Для каждого значения температуры  $T_c$ , измеренного термокосой, путем сравнения с рядом температуры микроструктурного зонда  $T_i$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ , находилось такое значение  $i$ , для которого выполнялось условие  $T_i \geq T_c \geq T_{i+1}$ ,  $T_i > T_{i+1}$ . Затем рассчитывалось

значение солености  $Sp$  для места расположения термокосы по формуле линейной интерполяции

$$Sp = S_i + (T_c - T_i)(S_{i+1} - S_i)/(T_{i+1} - T_i).$$

С использованием данной методики были проведены расчеты значений солености и плотности воды в местах расположения термисторных станций.

На рис. 3в в качестве примера приведены три вертикальных профиля плотности, измеренные микроструктурным зондом 3 сентября 2004 г. в районе станции Cd (см. рис. 8а). Из приведенных графиков следует, что слой скачка плотности располагался на глубинах 30–50 м, создавая препятствие для подъема струи сбрасываемых вод в поверхностные слои.

Результаты модельных расчетов начального разбавления и глубины всплыивания в местах расположения станций Ca, Cd показаны на рис. 5а–5е. На представленных графиках по оси x приведено время в сутках относительно начала измерений на указанных станциях. Для условий стратификации, характерных для места расположения станции Ca (см. рис. 1а), с 14 по 26 августа 2004 г. струя была, в основном, затопленной (см. рис. 6б), за исключением непродолжительных промежутков времени, когда диффузор оказывался в области подошвы приливной внутренней волны большой амплитуды. В эти моменты перепад температуры в слое над диффузором уменьшался до значений менее 1°C и струя кратковременно всплыvala на поверхность. На рис. 5в и 5г показаны увеличенные фрагменты рис. 5б, представляющие графики глубины всплыивания струи на станции Ta в моменты времени, когда происходили кратковременные подъемы струи на поверхность: в) – с 15 ч 14 мин 15 августа 2004 г. до 13 ч 50 мин 16 августа 2004 г.; г) – с 23 ч 50 мин 20 августа 2004 г. до 21 ч 02 мин. 21 августа 2004 г. Отметим, что на “глубокой” ст. Cd, где амплитуда приливов была значительно меньше, ослабление стратификации в фазы прилива было более слабым и всплыивание струи на поверхность не происходило (см. рис. 5д и 5е). Поэтому в период времени с 23 августа по 6 сентября 2004 г. струя оказалась полностью затопленной и располагалась на глубинах 25–55 м (см. рис. 5е). В целом характер временной изменчивости глубины всплыивания (рис. 5б и 5е) и начального разбавления (рис. 5а и 5д) струи в 2004 г. был таким же, как и сентябрь 2002 г. [4], что, вероятно, является типичным для сезона конца лета–начала осени в этом районе.

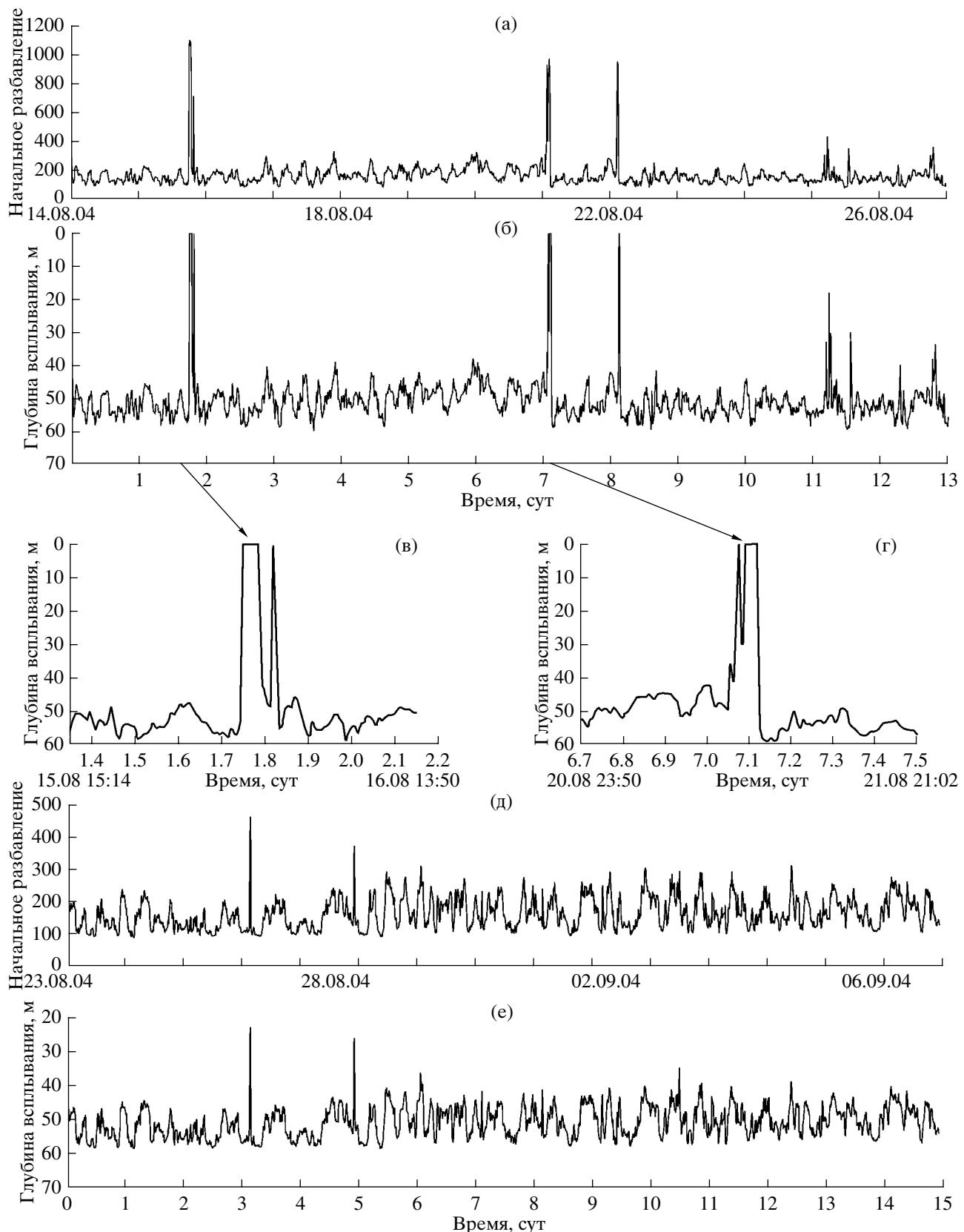
Для оценки влияния соленостной стратификации на высоту всплыивания и начальное разбавление струи в районе станции Cd были проведены расчеты, как с учетом наличия стратификации, так и в предположении постоянства солености ( $S = 35\%$ ) в диапазоне глубин 0–70 м. Оказалось, что учет соленостной стратификации приводит к уменьшению высоты всплыивания на ~2.2 м и уменьшению начального разбавления со 187 до 164.

## АНАЛИЗ TS-ИНДЕКСОВ

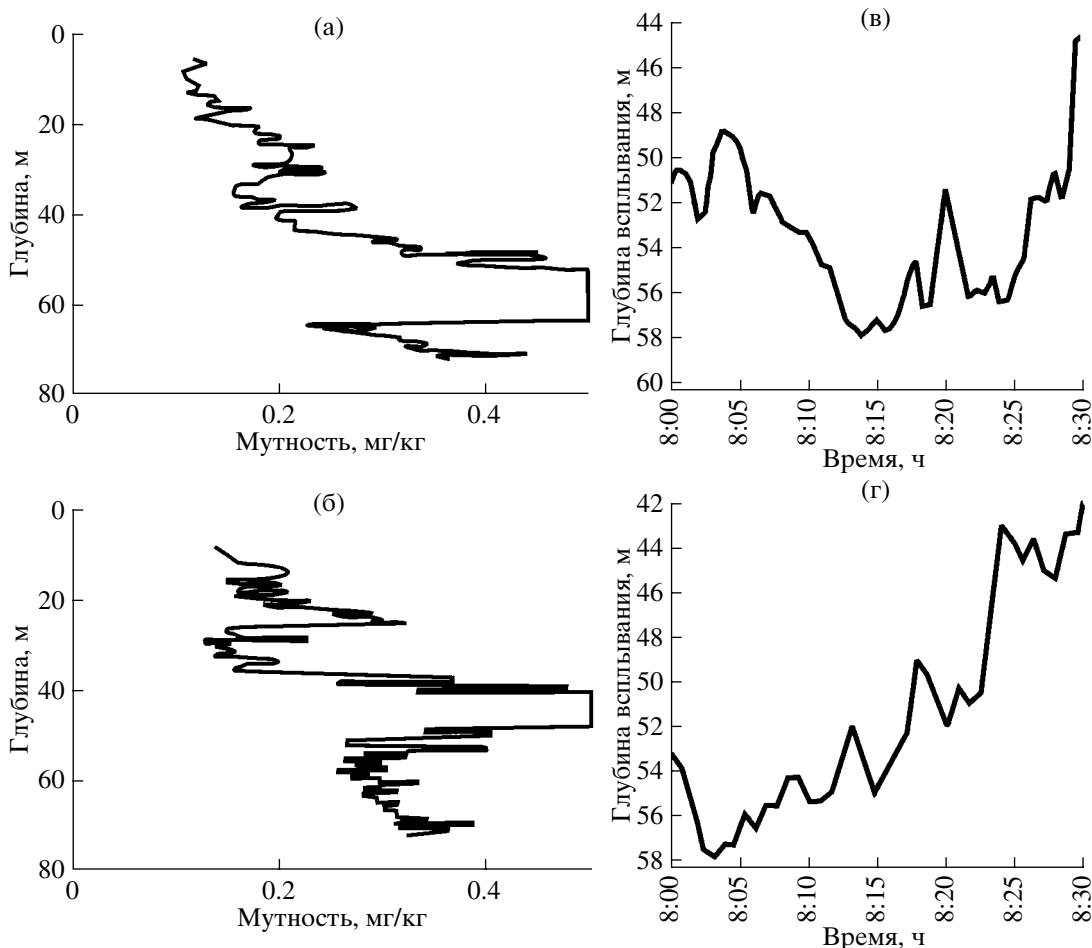
При проведении модельных оценок параметров струи в 2004 г. были рассчитаны TS-индексы сбрасываемых вод при достижении начального разбавления, проанализировано их расположение на TS-плоскости и проведено сравнение с натурными измерениями. Сравнение рассчитанных TS-индексов сбрасываемых вод с данными измерений показывает как наличие соответствия, так и различия между ними. Соответствие состоит в смещении TS-индексов сбрасываемых вод в сторону меньших значений солености примерно на 0.4%. Различие заключается в том, что по наблюдениям смещение TS-индексов относительно равномерно распределено в диапазоне 0–0.4%, тогда как рассчитанное смещение располагается в диапазоне 0.1–0.5%. Причина существования этого различия состоит в том, что рассчитанные TS-индексы соответствуют оси струи (где разность температуры и солености относительно фоновых невозмущенных значений максимальна) и моменту достижения начального разбавления (когда струя только что всплыла), тогда как в наблюдениях могут регистрироваться TS-индексы сбрасываемых вод на произвольном удалении от оси струи и возраст сточных вод может превышать время всплыивания (всплывшая когда-то вода успела изопикнически перемешаться с окружающей). Имеется и другое различие, заключающееся в том, что наблюдаемые TS-индексы сбрасываемых вод сгруппированы в виде двух квазизопикнических языков, тогда как рассчитанные TS-индексы такую двухязыковую структуру не проявляют. Проведенные расчеты показали, что в качестве вероятной причины существования “двуухлестковой” изопикнической структуры TS-индексов сбрасываемых вод может рассматриваться изменение глубины моря вдоль диффузора. Следует также отметить, что обнаруженная “двуухлестковая” структура TS-индексов сбрасываемых вод может быть следствием недостаточной статистики измерений микроструктурным зондом в непосредственной близости диффузора.

## ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Адекватность используемой модели для определения параметров турбулентной струи оценивалась путем сопоставления результатов расчетов с данными натурных измерений. Как уже отмечалось выше, при проведении комплексных экспериментов в акватории б. Мамала у о. Санд, осуществлялись измерения с помощью стационарных буйковых станций, а также буксируемых и погружаемых микроструктурных зондов, гидрооптических и гидробиологических датчиков [1, 5–7, 12–15, 17, 8, 21]. По результатам этих измерений определялись параметры распространения струи: горизонты всплытия, направления и скорость распространения, кон-



**Рис. 5.** Модельные расчеты начального разбавления (а) и глубины всплыивания струи (б) на ст. Са в период с 14 по 26.08.2004 г.; (в, г) – увеличенные фрагменты рис. 5б для 2-х моментов кратковременного всплытия струи на поверхность: (в) – с 15 ч 14 мин 15.08.2004 г. до 13 ч 50 мин 16.08.2004 г. (г) – с 23 ч 50 мин 20.08.2004 г. до 21 ч 02 мин 21.08.2004 г.; оценки начального разбавления (д) и глубины всплыивания струи (е) на ст. Cd с 23.08 по 06.09.2004 г. Здесь и далее указано местное время.



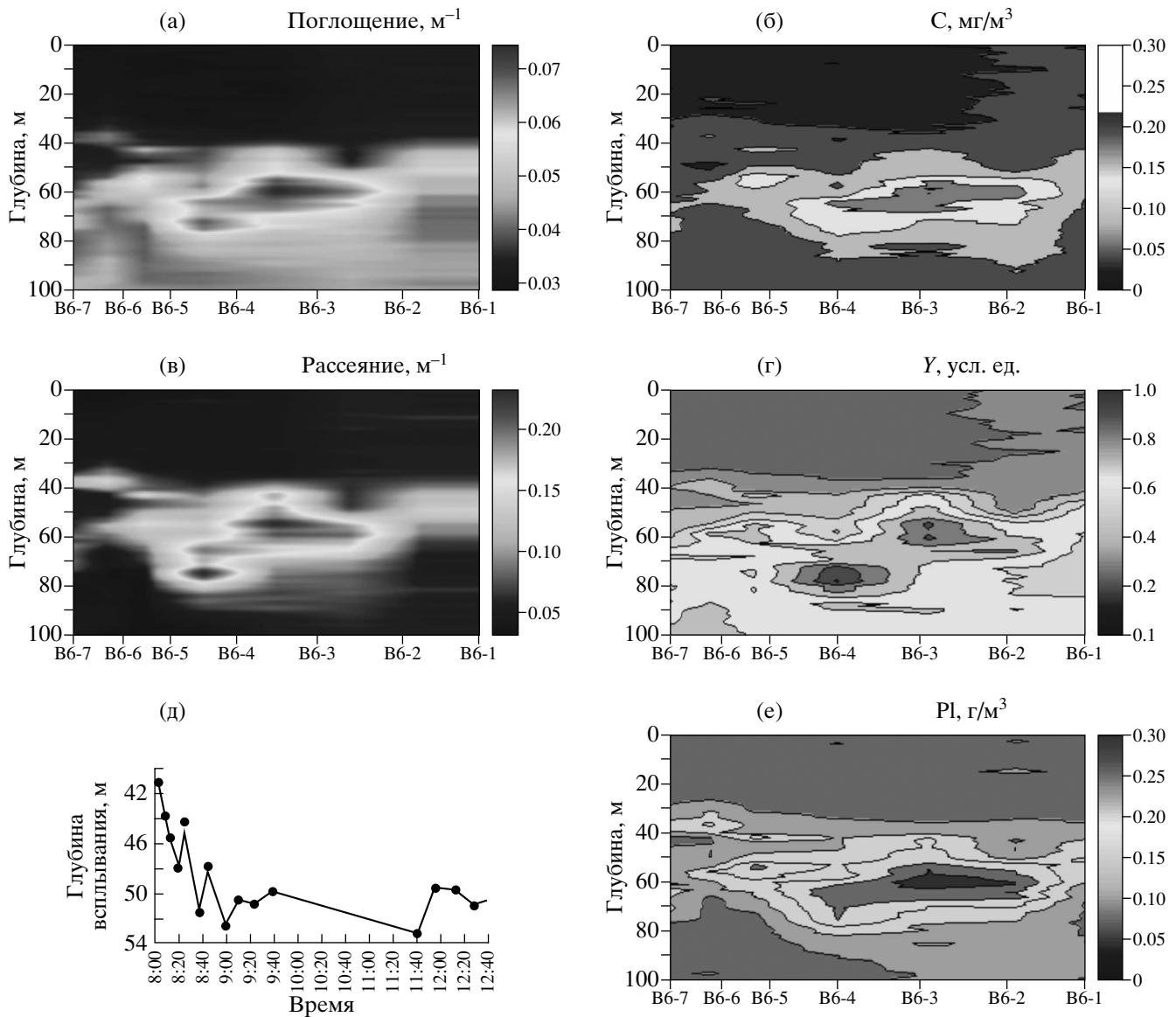
**Рис. 6.** Вертикальные профили мутности, измеренные микроструктурным зондом вблизи ст. Cd 01.09.2004 г. (а) и 02.09.2004 г. (б) в моменты времени 08:17–08:20. Модельные оценки уровней всплыивания струи сбрасываемых вод в районе ст. Cd для 01.09.2004 г. (в) 02.09.2004 г. (г) в период времени 08:00–08:30.

центрация загрязняющих веществ на различных глубинах и расстояниях от диффузора.

На рис. 6а и 6б в качестве примера представлены вертикальные профили мутности морской воды, измеренные с помощью микроструктурного зонда вблизи ст. Cd 1 сентября 2004 г. (а) и 2 сентября 2004 г. (б) в период местного времени с 08:00 до 08:30. Из анализа профилей мутности, представленных на рис. 6а и 6б, видно, что всплывшая струя сбрасываемой воды, идентифицируемая по увеличению мутности, располагалась в слое толщиной 15–20 м на глубинах 40–60 м, при среднем горизонте ~53 м. Результаты моделирования и расчетов горизонтов подъема струи в районе станции Cd в моменты времени с 08:00 до 08:30 для 1 и 2 сентября 2004 г., приведены на рис. 6в и 6г соответственно. Из графиков, представленных на этих рисунках, следует, что, по данным расчетов, уровень подъема струи 1 и 2 сентября 2004 г. в исследуемые периоды времени составлял 42–58 м. Это достаточно хорошо согласуется с результатами контактных измерений (рис. 6а и 6б).

Измерения гидрооптических характеристик в 2004 г. проводились с помощью прибора АС-9. С помощью этого прибора измерялись коэффициенты поглощения и ослабления на 9 длинах волн в спектральном диапазоне 412–715 нм [5, 12]. По результатам этих измерений рассчитывались концентрации примесей: хлорофилла, растворенных органических веществ, мелких и крупных частиц [5]. Измеряемые гидрооптические характеристики и рассчитываемые концентрации примесей позволяли определить расположение области загрязнения, вызванной глубоководным сбросом. Результаты таких измерений подробно описаны в работе [5].

На рис. 7а–7е приведены двумерные распределения коэффициентов поглощения (а), рассеяния (в), измеренные 3 сентября 2004 г. прибором АС-9 на трассе В6-7–В6-1 в районе сброса, а также рассчитанные по ним с использованием модели Халтрана–Копелевича концентрации хлорофилла (б), растворенных органических веществ (г) и крупных частиц (е) [5]. Для совместного анализа модельных оценок распространения струи сбрасываемых вод и гидро-



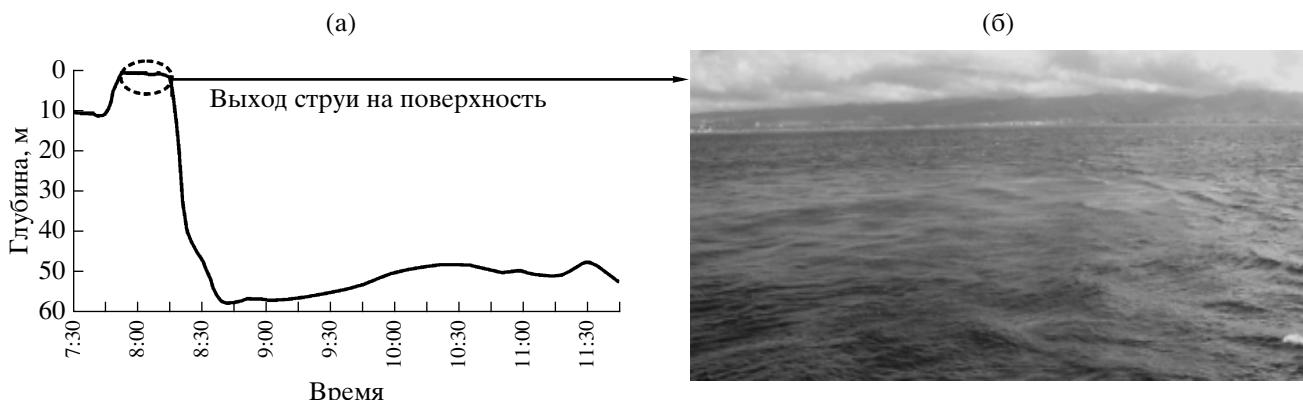
**Рис. 7.** Двумерные распределения коэффициентов поглощения (а), рассеяния (б), измеренные 03.09.2004 г. вблизи диффузора с помощью прибора АС-9 на ст. B6-1–B6-7, и расчетанные по ним концентрации хлорофилла (б), растворенных органических веществ (г) и крупных частиц (е); модельные оценки глубины всплыивания струи 03.09.2004 г. в период 08:00–12:40 (д). На рис. 7а–7г и 7е по оси х представлено расстояние между ст. B6-1 – B6-7.

оптических характеристик водной среды были выбраны результаты измерений, выполненные в период с 11 ч 45 мин до 12 ч 17 мин в точках, наиболее близко расположенных к диффузору. Из анализа рис. 7 следует, что по данным гидрооптических измерений сбрасываемые воды в этот период времени 3 сентября 2004 г. поднимались до горизонтов 50–55 м, что близко к результатам модельных расчетов 50–53 м, приведенным на рис. 7д.

При проведении гидрофизических измерений в 2004 г. вблизи диффузора наблюдалась поверхностная аномалия, связанная со всплытием сбрасываемых вод. Фотография этой аномалии, полученная с борта исследовательского судна в 08 ч 00 мин 12 ав-

густа 2004 г., приведена на рис. 8б. Результаты модельных расчетов глубины всплытия струи, проведенные для этого дня в период с 7 ч 30 мин до 11 ч 45 мин, представлены на рис. 8а. По данным модельных расчетов кратковременное всплытие струи на поверхность океана происходило в период 7 ч 50 мин–8 ч 15 мин. Это хорошо согласуется со временем наблюдения аномального пятна на поверхности океана. Подобная картина наблюдалась и в экспериментах 2002 г. [4].

Хорошее соответствие результатов модельных расчетов характеристик распространения струй сбрасываемых вод с результатами гидрофизических и гидрооптических измерений свидетельствуют об



**Рис. 8.** Временной ход высоты всплыивания струи, рассчитанный для 12.08.2004 г. (07:30–11:45) по данным измерений стратификации среды MSS-зондом, CTD-датчиками и термисторной станцией Ca (а); фотография аномального пятна в районе диффузора, получения 12.08.2004 г. (~08:00) (б).

адекватном описании с помощью применяемой математической моделью механизма распространения турбулентных струй в прибрежных акваториях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью математической модели, описывающей распространение турбулентной струи в стратифицированной среде, проведены расчеты характеристик глубоководного сброса с о. Санд в акваторию б. Мамала (Гавайские о-ва). С использованием измеренных характеристик стратификации среды получены модельные оценки временной изменчивости глубины всплыивания и начального разбавления струи в августе–сентябре 2003 и 2004 г. Показано, что стратификация в б. Мамала в этот период времени подвержена значительным колебаниям под действием приливо-отливных течений и вызванных ими внутренних волн, что хорошо согласуется с результатами других исследований [3, 6, 13, 20]. Установлено, что вертикальные колебания термоклина под действием приливов бывают столь велики, что даже в летний период при устойчивой стратификации сбрасываемые воды могут достигать поверхностного слоя.

В результате проведенных исследований выявлено, что в период проведения экспериментов в 2003 г. верхний квазиднородный слой простирался до глубин 50–70 м, стратификация в слое над диффузором была существенно ослаблена, поэтому струя сбрасываемых вод часто достигала поверхности моря. В 2004 г. в б. Мамала наблюдалась устойчивая стратификация, вследствие чего струя была, в основном, затопленной, за исключением непродолжительных промежутков времени, когда в слое воды над диффузором сбросовой системы под действием приливной внутренней волны большой амплитуды стратификация оказывалась существенно ослабленной.

На основании сопоставления расчетных и измеренных TS-индексов выявлено их существенное от-

личие, проявляющееся в появлении “двуухлестковой” квазизопикнической структуры измеренных TS-индексов в зоне смешения сбрасываемых пресных вод и соленой океанской воды. Такая структура может быть связана с изменением глубины установки диффузора сбросового устройства, влияние которого превышает влияние вариаций режима сброса.

Проведенное сравнение результатов модельных расчетов с данными экспериментальных измерений характеристик распространения струи примеси, выполненными с помощью гидрофизических (CTD- и MSS-зондами) и гидрооптических (AC-9) погружаемых датчиков, показало их хорошее соответствие. Это свидетельствует об адекватном описании применяемой математической моделью механизма распространения турбулентных струй в стратифицированной среде. Полученные результаты математического моделирования распространения струи сбрасываемых вод в морской среде продемонстрировали эффективность применения предложенной модели для исследования воздействий заглубленных стоков на прибрежные акватории.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондури В.Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии // Новые идеи в океанологии. Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова. Т1. Физика. Химия. Биология, М.: Наука, 2004. С. 55–117.
2. Бондури В.Г., Гребенюк Ю.В. Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исследование Земли из космоса. 2001. № 6. С. 1–19.
3. Бондури В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д. Изменчивость внутренних приливов в прибрежной акватории о. Оаху (Гавайи) // Океанология. 2008. Т. 48. № 5. С. 661–671.
4. Бондури В.Г., Журбас В.М., Гребенюк Ю.В. Математическое моделирование турбулентных струй

- глубинных стоков в прибрежные акватории // Океанология. 2006. № 6. С. 805–820.
5. Бондур В.Г., Киллер Р.Н., Старченков С.А., Рыбакова Н.И. Мониторинг загрязнений прибрежных акваторий океана с использованием многоспектральных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения // Исследование Земли из космоса. 2006. № 6. С. 42–49.
  6. Бондур В.Г., Филатов Н.Н., Гребенюк Ю.В. и др. Исследования гидрофизических процессов при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории (на примере бухты Мамала, о. Оаху, Гавайи) // Океанология. 2007. Т. 47. № 6. С. 827–846.
  7. Веденников В.И., Бондур В.Г., Виноградов М.Е. и др. Антропогенное воздействие на планктонное сообщество акватории бухты Мамала (о. Оаху, Гавайские острова) по судовым и спутниковым данным // Океанология. 2007. Т. 47. № 2. С. 241–258.
  8. 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.
  9. Виноградов М.Е. Роль океана в жизни и сохранении биосферы Земли // Глобальные экологические проблемы на пороге XXI века. М.: Наука, 1998. С. 99–118.
  10. Израэль Ю.А., Цыбань А.В. Антропогенная экология океана. М.: Гидрометиздат, 1989. 528 с.
  11. Озмидов Р.В. Диффузия примесей в океане. Л.: Гидрометиздат, 1986. 280 с.
  12. Bondur V.G. Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas // Proc. of 31 Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, St. Petersburg, 2005. P. 1–6.
  13. 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
  14. Bondur V., Tsidilina M. Features of Formation of Remote Sensing and Sea truth Databases for The Monitoring of Anthropogenic Impact on Ecosystems of Coastal Water Areas // Proc. of 31 Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, St. Petersburg, 2005. P. 192–195.
  15. Gibson C.H., Bondur V.G., Keeler R.N., Leung P.T. Energetics of the Beamed Zombie Turbulence Maser Action Mechanism for Remote Detection of Submerged Oceanic Turbulence // J. of Applied Fluid Mechanics. 2006. V. 1. № 1. P. 11–42.
  16. Fisher H.B. Mixing in Inland and Coastal Waters. Academic Press, 1979. 484 p.
  17. Keeler R., Bondur V., Vithanage D. Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // Sea Tech. 2004. № 6. P. 53–58.
  18. Keeler R., Bondur V., Gibson C. Optical satellite imagery detection of internal wave effects from a submerged turbulent outfall in the stratified ocean // Geoph. Res. Letters. 2005. V. 32. L12610, doi: 10.1029/2005GL022390.
  19. Merrifield M.A., Alford M.H. Structure and variability of semi-diurnal internal tides in Mamala Bay, Hawaii // J. Geophys. Res. 2004. 109 (C8), doi: 10.1029/2003JC002049.
  20. Petrenko A.A., Jones B.H., Dickey T.D. et al. Effects of a sewage plume on the biology, optical characteristics and particle size distributions of coastal waters // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № C11. P. 25061–25071.
  21. Wolk F., Prandke H., Gibson C.G. Turbulence Measurements Support Sattelite Observation // Sea Tech. 2004. V. 45. № 11. P. 47–52.

## Modeling and Experimental Research of Turbulent Jet Propagation in the Stratified Environment of Coastal Water Areas

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

The results of model calculations and experimental research of turbulent jet propagation in stratified environment with reference to the Sand Island wastewater outfall (Hawaii) are considered. The jet's emergence and initial dilution were estimated on the basis of model calculations and experimental data of the stratified environment characteristics in 2003–2004. The reason of appearance of “two-lobe” quasi-isopycnic structure in the waste and ocean water mixing area was clarified; TS-index analysis was carried out. The jet's calculation data was compared to experimental measurements completed with hydro physical and hydro optical equipment; model and experimental data corresponded closely. Hydro physical conditions and tidal influence on wastewater turbulent jet characteristics (horizon of jet's emergence) is showed up. The obtained output testifies to the adequate model for the research of deep outfall turbulent jet propagation in the stratified environment of coastal water areas.