

**К ВОПРОСУ МЕТОДИКИ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В
ЗОНЕ СОПРЯЖЕНИЯ СУШИ И МОРЯ**

Ю.П. Ломанов, В.В. Питеряков
Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

Гидрофизические исследования являются частью геоэкологического мониторинга зоны сопряжения суши и моря (ЗССМ). Цель гидрофизических исследований: получение количественных характеристик, моделей и прогнозных оценок горизонтального и вертикального распространения и трансформации загрязняющих веществ, поступающих в прибрежную зону моря с береговыми стоками и атмосферными осадками.

Основные задачи гидрофизических исследований:

- исследование фоновых гидрологических характеристик крупномасштабной термохалинной структуры, плотностной стратификации вод, поля скоростей течений,
- исследование пространственно-временных характеристик тонкой структуры (ТС) и микроструктуры (МС) гидрофизических полей, их связи с крупномасштабными фоновыми гидрологическими условиями, районирование исследуемых акваторий по свойствам ТС и МС,
- исследование пространственно-временных характеристик короткопериодных внутренних волн (КВВ), их связи с полем скоростей течений и плотностной стратификацией,
- исследование характеристик макро- и мелкомасштабной турбулентности, их связи с КВВ, полем скоростей течений, ТС и МС гидрофизических полей,
- исследование трехмерной тонкой структуры фронтальных зон (речного стока, вихревых образований, систем течений и др.), интрузионного расслоения фронтальных зон.

Турбулентность и внутренние волны играют важнейшую роль в динамике и термике морей, представляя те процессы, которые в основном ответственны за изменчивость морей в области малых масштабов, вертикальное перемешивание вод, перенос и трансформацию различных видов энергии и, наконец, определяют стоки и диссиацию кинетической энергии движений более крупных масштабов.

Внутренние волны являются одним из основных источников энергии турбулентности, механизмы генерации которой, по-видимому, связаны, главным образом, с явлением локальной гидродинамической неустойчивости. Оба вида движений в значительной степени зависят от локальных условий стратификации среды - средних гидрологических характеристик и тонкой вертикальной структуры гидрофизических полей и, в свою очередь, активно участвуют в формировании мелкомасштабной пространственно-временной структуры моря.

Комплексные исследования турбулентности, внутренних волн и тонкой вертикальной структуры моря необходимы для понимания механизмов, управляющих процессами вертикального обмена энергией, массой, теплом через термоклин, формированием теплозапаса верхнего деятельного слоя моря и его изменчивости в связи с проблемой взаимодействия моря и атмосферы для разработки соответствующих физических моделей.

Для задач исследования пространственной и временной изменчивости ТС и КВВ наиболее целесообразным является использование зондирующих приборов и (или) многогоризонтных гирлянд измерителей гидрофизических параметров.

Гирлянды разнесенных по глубине измерителей температуры используются в исследованиях океана с начала шестидесятых годов. В гирляндах могут быть применены как точечные измерительные элементы, так и измерительные элементы, распределенные по вертикали опре-

деленным образом. Гирлянды могут буксироваться за судном, вывешиваться с дрейфующего судна или с неподвижной платформы, выставляться на автономных или дрейфующих буйковых станциях.

Для ряда задач, например, при изучении формирования квазиоднородных пятен и тонкой структуры, вертикального обмена, волновых деформаций стратификации необходима установка измерительной гирлянды на зажоренном или свободно дрейфующем буе. Применение такой гирлянды позволяет проследить внутреннюю структуру высокоградиентных прослоек, деформацию этих прослоек КВВ, последовательное разрушение частей прослойки при обрушении внутренней волны и формирования новой высокоградиентной прослойки. С помощью гирлянд можно измерять амплитуды КВВ, проводить оценку частот КВВ, измерять тонкую структуру температурной стратификации и ее деформацию при прохождении волн различных масштабов.

Присутствие мезомасштабных волн приводит к требованию, чтобы гирлянда была достаточно протяженной по вертикали и имела достаточно большое количество измерителей. Из-за технических сложностей изготовить такие гирлянды трудно. Поэтому используются частые зондирования измерительными комплексами до необходимой глубины.

Для Черного моря в летний период характерна приблизительно такая стратификация температуры в верхнем слое, какой она показана на рис. 1, а, б, в, г. Глубина залегания термоклина изменяется при прохождении внутренних волн. Здесь виден сравнительно резкий переход от верхнего перемешанного слоя к стратифицированному по температуре (плотности, солености) термоклину. Само по себе отдельное зондирование, конечно, представляет интерес, но для непосредственного измерения параметров внутренних волн, для экспериментальной оценки их модального состава,

для теоретических расчетов волнового состава или, например, для изучения вертикального обмена и т.д. больший интерес представляет совокупность зондирований и, далее, определенным образом обобщенные (средние) характеристики стратификации и относительные вариации распределения температуры (солености, плотности) в отдельных зондированиях.

Какие обобщенные (средние) характеристики целесообразно применять для этих целей? По большей части, за основу берется среднее распределение температуры (солености, плотности) по глубине $\bar{T}(Z)$ и отклонения $T_i(Z) - \bar{T}(Z)$.

Осредненные показанные на рис. 1, а, б, в, г профили (пусть для определенности здесь и далее это будут профили температуры) и в результате получим осредненный профиль, который показан на рис. 1, д

и, который принципиально не похож ни на один из индивидуальных профилей.

На наш взгляд это методически неудачное осреднение. Соответственно, методические погрешности содержат и все отклонения $T_i(Z) - \bar{T}(Z)$ и, чем больше амплитуда колебаний верхней границы термоклина, тем больше ошибки. Такие погрешности могут быть несущественными для расчета волн низшей моды, но в целом такая методика осреднения существенно обедняет экспериментальный материал. Так, например, они затрудняют теоретическую и экспериментальную оценку волн высокой моды и делают полностью ошибочной оценку вертикального молекулярного потока тепла. Так как для стратификации в море характерна слоистая структура, то рассмотренное осреднение вносит существенную погрешность повсеместно.

Физически более содержательно находить не среднюю температуру \bar{T} на заданной глубине Z , а, наоборот, находить среднюю глубину \bar{Z} залегания

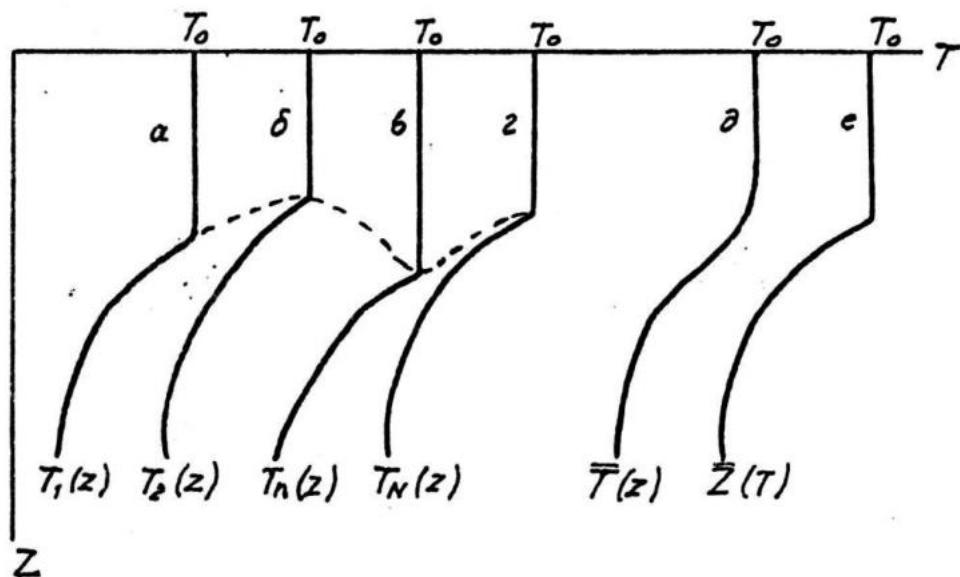


Рис. 1. T_1, T_2, T_n, T_N - характерные профили верхнего однородного слоя и сезонного термоклина в летний период в Черном море. Средний профиль $\bar{T}(z)$ качественно отличается от индивидуальных профилей, тогда как средний профиль $Z(T)$ хорошо отражает особенности отдельных профилей.

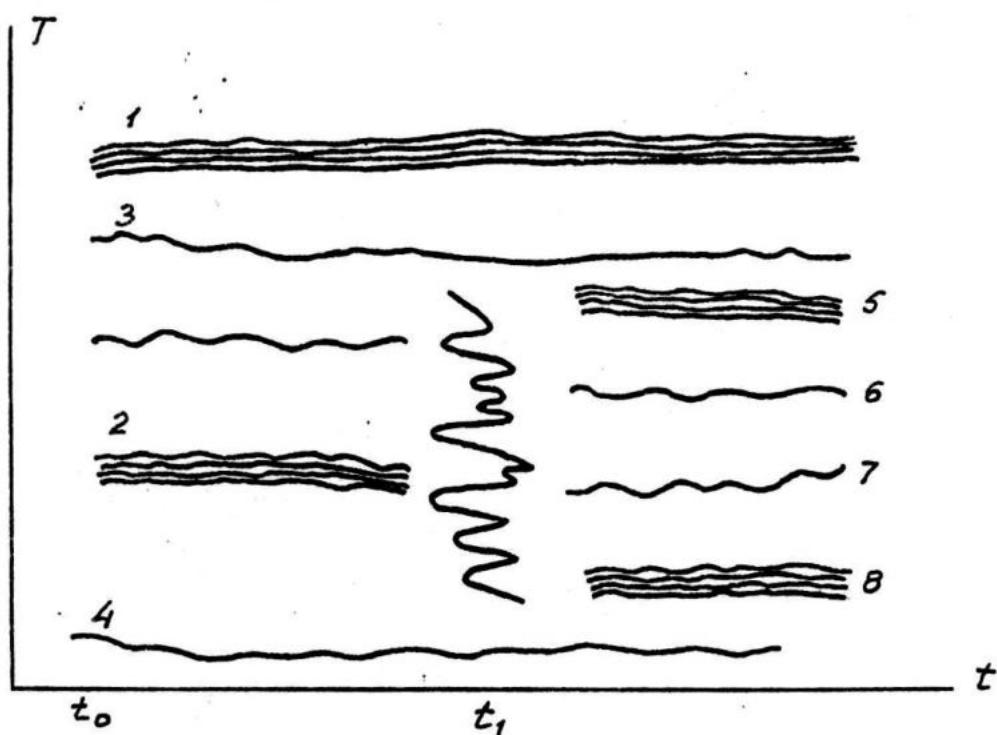


Рис. 2. Схема локального переформирования стратификации температуры при $t > t_1$. Сравнение распределения изотерм в исходной (1, 2, 3, 4) и новой стратификации (5, 6, 7, 8) позволяет оценить вертикальное перемешивание.

наперед заданных, заданных еще до начала эксперимента, изотерм
 $T_i = T_o - i \Delta T$, следовательно, вместо осреднения $\bar{T}(Z_i)$ производить осреднение

$$\bar{Z}(T_i = T_o - i \Delta T), \quad (1)$$

где ΔT - также наперед заданная постоянная величина.

При зондировании в результате дискретных отсчетов получается набор значений температуры $\{T_k\}$, который может совсем не совпадать с заданным набором T_i (1). Такое же несоответствие получается при измерениях гирляндой измерителей температуры.

Рассмотрим методику представления и обработки результатов измерений с помощью зондирующих приборов или многогоризонтной гирлянды измерителей.

По точечной совокупности результатов измерений $\{T_k, Z_k\}$ в зондировании строится непрерывный кусочно-линейный профиль $T(z)$, проходящий через точки измерения. На этом профиле присутствуют уже все температуры.

Из этого профиля выбираются значения температуры (1) и соответствующие им глубины z_i . Совокупность пар чисел

$$\{T_i = T_o - i \Delta T, Z_{ni}\}; n = 1, 2, \dots, N, \\ i = 0, 1, 2, \dots, I; \quad (2)$$

при фиксированном n рассматривается как столбец, отображающий результаты одного зондирования с номером n ; серия зондирований образует таблицу (2). Для того, чтобы дальнейшее применение таблицы было удобным, T_o выбирается таким образом, чтобы оно присутствовало во всех зондированиях. Таким образом, T_o - наибольшая из общих для всех зондирований температура (желательно, хотя это и не обязательно, чтобы T_o было кратным

$\Delta T : T_0 - n_0 \Delta T$). Наибольший номер $i_{max} = I$ выбирается таким образом, чтобы $T_i = T_o - I \Delta T$ было наименьшей температурой из общих для всех зондирований температур $T_c - i \Delta T$. Выбор T_o и I мы называем выделением наибольшего фи-

зического слоя. С учетом того, что абсолютная температура измеряется с погрешностью $\pm 0,05^\circ\text{C}$ мы выбирали, как правило, минимальное приращение $\Delta T = 0,2^\circ\text{C}$. Перечисленные процедуры предусмотрены программой, входными данными для которой служат первичные результаты измерений (при этом в действительности кусочно-линейной профиль не строится, вместо этого по формулам и экспериментальным данным находятся только значения Z_{in} для заданных температур T_i).

Пусть таблица (2) построена, подведем предварительный итог: каждая строка матрицы (2) показывает колебания той или другой изотермы в ходе зондирований; осреднение вдоль строки дает среднее положение изотермы; столбец осредненных таким образом строк дает средний профиль; индивидуальные профили дают столбцы с номерами n ; средний профиль (рис. 1, e) качественно похож на индивидуальные (рис. 1, a, b, v) и отличается от них тем, что не содержит кинематических эффектов.

Взаимная корреляция между строками может служить для исследования модального состава внутренних волн и других целей. Возможно построение и других функций, в том числе взаимных со сдвигами по вертикали (по строкам) и по горизонтали (по столбцам) по усмотрению потребителя. Однако такие исследования имеют больше смысла в случае измерения гирляндой, так как зондирования производятся слишком редко, в случайных точках по отношению к среде и не одновременно по глубине.

Перейдем к формализации случаев стратификации с инверсиями. Уточним, что здесь речь идет об инверсиях исследуемого параметра, что не всегда соответствует инверсиям плотности, однако, исследуемым параметром может быть и плотность. В случае с инверсиями приращения температуры с ростом глубины могут быть как положительными, так и отрицательными, поэтому индексация (2) оказывается недостаточной. Обоб-

щим индексацию (2) на случай с инверсиями. Условимся считать, что

n - как и раньше, номер зондирования или номер измерений с помощью гирлянды;

m - номер строки в таблице, наибольший номер строки M , зависит от номера зондирования n , так как количество и амплитуда инверсий в различных зондированиях может быть разной;

i - индекс, определяющий температуру.

Таблицу серии зондирований можно обозначить как

$$\{T_{nm} = T_o - i\Delta T, Z_{nmi}\}, \quad (3)$$

где индексы n и m - это порядковые номера; индекс i - это не порядковый номер, а результат измерения температуры в зондировании с номером n . Обозначение таблицы (3) можно упростить до

$$\{Z_{nmi}\} \quad (3.1)$$

Каждый элемент (pm) реальной таблицы (3) содержит пару чисел - температуру и глубину.

На основании таблицы (3), для удобства исследования кинематических деформаций, строится аналог таблицы (2). Для этого вводится несколько условностей. В столбце таблицы (3) одна и та же температура $T_o - i\Delta T$ может повторяться несколько раз. Основной изотермой $T_o - i\Delta T$ серии зондирований считается та, которая соответствует наибольшим номерам строк m при фиксированном i . Наблюдаемым физическим слоем считается слой, ограниченный основными изотермами. Наибольший наблюдаемый физический слой ограничен основными изотермами с наибольшим и наименьшим индексами i , общими для всех зондирований. Кинематическая матрица

$$\{T_i = T_o - i\Delta T; Z_{ni}; k\} \quad (2.1)$$

содержит только основные изотермы и отличаются от таблицы (2) параметром k , который показывают число повторов изотермы T_i в столбце n таблицы (3). Для удобства в матрице (2.1) вводится своя нумерация строк (i). Если потребителю

таблицы (2.1) нужны какие-то данные из таблицы (3), то обращение к таблице (3) может производиться по индексам n и i общим для таблиц (2.1) и (3). Указание числа (k) повторов изотерм позволяет легко для исследования кинематических деформаций выделить физический слой без инверсий ($k=1$). Если обрушения волн (инверсии) повторяются не слишком часто, то для оценочного исследования кинематических деформаций можно применять всю таблицу (2.1).

Изложенная форма представления результатов зондирований удобна также для экспериментального исследования вертикального обмена по результатам измерений с помощью гирлянды. Продемонстрируем это на условном примере (рис. 2), который выбран предельно благоприятным для интерпретации. По горизонтальной оси показано время t , по вертикальной оси отложена температура. На рисунке показаны изотермы: (1) и (2) - начальные высокоградиентные прослойки. Гирлянда предполагается достаточно протяженной по вертикали для того, чтобы пересечь несколько высокоградиентных прослоек, и снабженной достаточно большим количеством измерителей для того, чтобы выявить структуру стратификации. В момент времени t_1 происходит обрушение волн (которые здесь для простоты не показаны) или перемешивание по другим причинам. Затем через некоторое время (это могут быть не только минуты, но и часы) устанавливается новая стратификация с высоко градиентными прослойками (3) и (4) на границах перемешанной области. Если есть такие результаты в большом количестве, то можно определить частоту появления и вертикальный масштаб переформирования стратификации, а также, благодаря присутствию изотерм (5), (6), (7) и (8), коэффициент перемешивания, что уже является прямым измерением вертикального обмена.

В заключение продемонстрируем применение изложенной методики измерения с помощью гирлянды (рис.3).

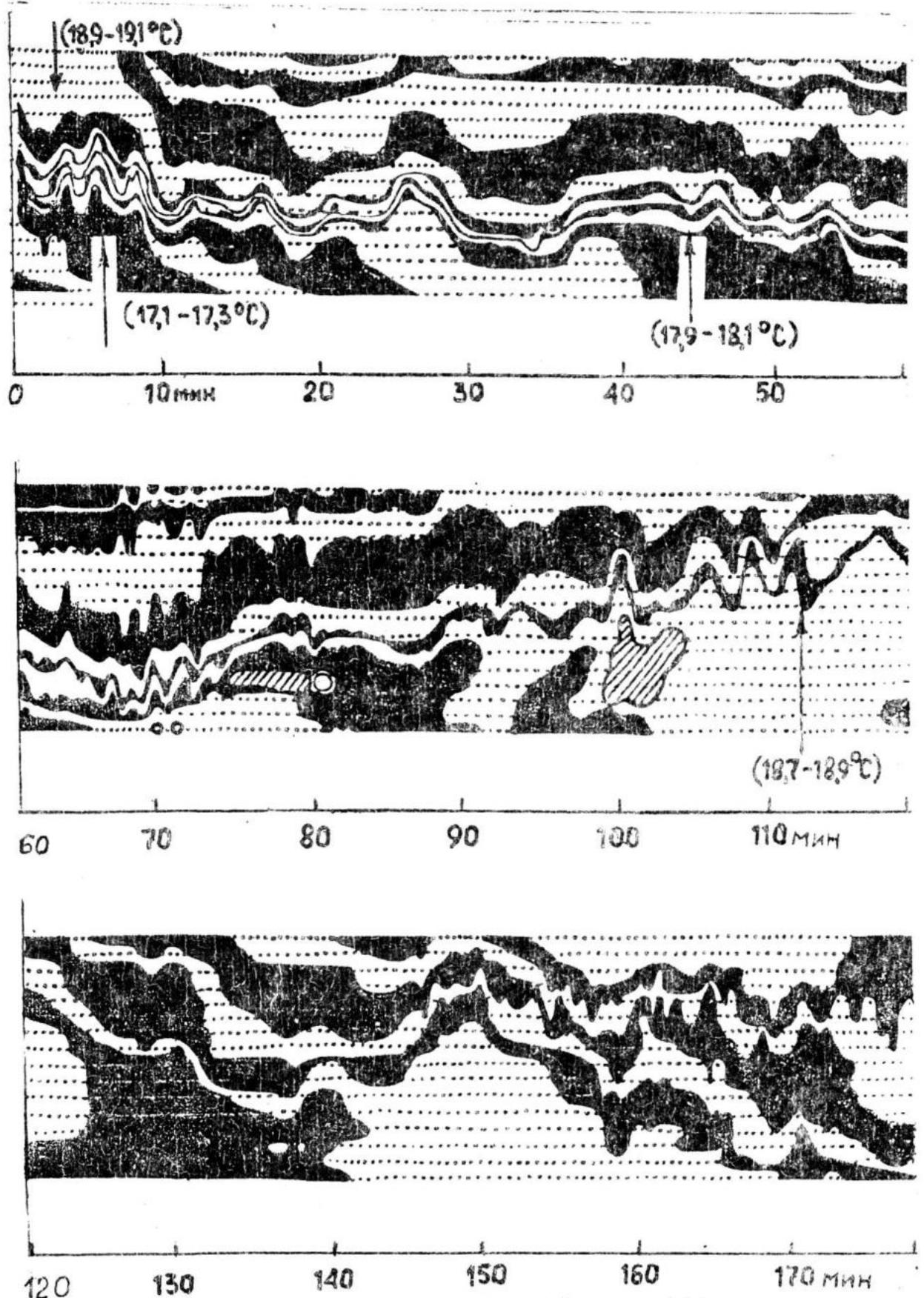


Рис. 3. Эволюция термоклина по данным гирлянды приборов "ГРАДИЕНТ"
Изменение температуры в каждой одноцветной области составляет 0.2 °С.

Гирлянда была установлена на притопленной свободно дрейфующей буйковой станции, снабжена 17 измерителями температуры "ГРАДИЕНТ", отстоящими по вертикали на 0,43 м друг от друга и находящимися на глубине от 55 до 61,5 м (вертикальный размер гирлянды несколько больше 6,5 м). Эксперимент выполнялся в Средиземном море, измерения проводились синхронно на всех горизонтах через каждые 15 с. На рисунке по вертикали отложена глубина, горизонтальные пунктирные линии показывают положение измерителей; горизонтальная ось интерпретируется как время. На рис.3 представлены изменения, происходившие в слое в течение трех часов. Затеменные и светлые полосы на рисунке разграничены изотермами, отстоящими друг от друга на 0,2°

С ($\Delta T = 0,2^\circ C$), так что перепад температуры в каждой полосе, светлой или темной, составляет 0,2° С.

В средней части рисунка видна высокоградиентная прослойка, перепад температуры в которой сначала достигает 1,4°С (средний градиент больше $1^\circ C m^{-1}$), затем высокоградиентная прослойка деградирует: от нее последовательно отслаиваются снизу и перемешиваются с окружающей средой все новые и новые

микрослои. Кое-где видны инверсии, представляющие собой изолированные области (заштриховано) или "языки". Наблюдается сложная система вертикальных колебаний. Проследивая вертикальное перемещение отдельных прослоек, можно предположить присутствие волны с видимым периодом порядка 2 часов и высотой 2-3 м. В начальное время видны короткопериодные колебания с периодом около 5 мин, высотой 1-1,5 м; они прослеживаются и в дальнейшем, но нередко короткопериодные изгибы прослоек скорее похожи на отрывающиеся капли или начинающиеся струи, которые, возможно, сопровождают разрушение этих самых волн. Видны также изменения толщины малоградиентных прослоек, похожие на кинематические обратимые деформации.

Приведенная иллюстрация показывает, что применение гирлянды измерителей и предложенная методика анализа дает ряд преимуществ при исследований вертикального обмена и процессов формирования тонкой слоистой стратификации.