

ИЗМЕРЕНИЕ ГЛУБИНЫ СЛОЯ СКАЧКА ПЛОТНОСТИ ЛАЗЕРНЫМ ЗОНДИРОВАНИЕМ

канд. геогр. наук В.Ю.БЕНЗЕМАН

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, e-mail: aaricoop@aari.nw.ru

Описаны эксперименты по лазерному зондированию с помощью самолетного лидара по-верхностного слоя воды в арктических морях в августе–сентябре 1988–1989 гг. В основу экспериментов положена проверка идеи И.Е.Фролова и автора данной статьи о возможности фиксации глубины залегания слоя скачка плотности воды лазерным излучением с самолета.

Ключевые слова: слой скачка плотности, лазерное зондирование

Применение лазеров для зондирования окружающей среды является много-сторонним. Лазеры:

- используются для измерения концентраций основных и малых составляющих атмосферы и, следовательно, хорошо подходят для контроля загрязнений;
- позволяют измерить термические, структурные и динамические характеристики как атмосферы, так и гидросферы;
- дают возможность регистрировать пороговые концентрации определенных составляющих, что требуется в некоторых системах аварийного предупреждения о загрязнениях;
- позволяют картографировать рассеивание сточных шлейфов;
- делают возможным распознавание спектральных образов таких объектов зондирования, как нефтяные пятна.

В 1988–1989 гг. (август–сентябрь) проводились эксперименты по лазерному зондированию верхнего (0–35 м) слоя океана на самолете-лаборатории ИЛ-18 с целью измерения глубины залегания слоя скачка плотности в арктических морях.

В 1988 г. район эксперимента был выбран в Карском море, которое характеризуется значительной переслоенностью вод. В августе в Карском море обычно наблюдается ярко выраженный слой скачка по температуре и солёности. В период с 22 августа по 2 сентября 1988 г. НИС «Профессор Мультиановский» выполняло гидрологическую съемку свободной ото льдов части Карского моря. Совместная работа самолета и судна производилась в центральной и юго-западной частях моря. Такой эксперимент проводился впервые. Зондирование осуществлялось с высот 110–230 м. Посылка импульса лидара («выстрел») производилась от 6 раз в секунду, т.е. примерно через каждые 15 м пути.

На рис. 1 показаны осредненные за 10-секундные интервалы времени значения всплесков на эхо-сигналах деполяризации, которые хорошо коррелируют с глубиной залегания нижней границы слоя скачка плотности по данным зондирования гидрозондом с НИС «Профессор Мультиановский».

Луч лазера фиксирует лишь взвешенные частицы в воде (гидрозоли) при размерах, близких к длине волны излучения, тогда происходит всплеск интенсивности на эхо-сигнале деполяризации. Если размеры частиц, попавших под луч лазе-

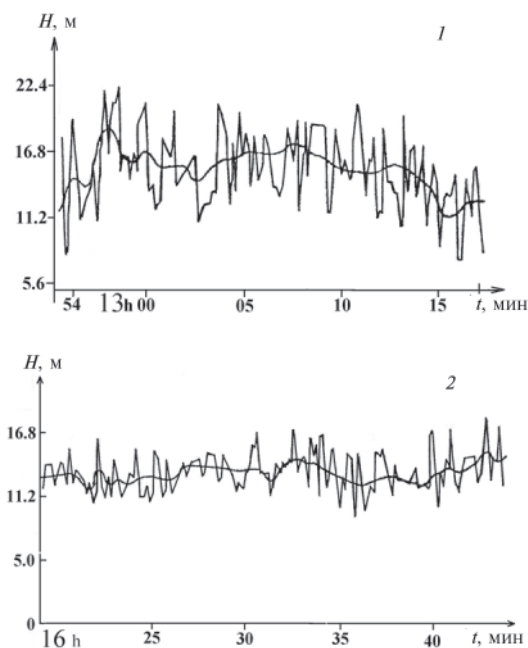


Рис. 1. Фрагменты записи зондирования глубины залегания слоя скачка плотности в центре юго-западной части Карского моря 26.08.1988 с помощью лазера как результат рассеяния от фитопланктона (нанопланктона):

1 – 73°05' с.ш., 62°50' в.д., $H = 65$ м; 2 – 73°00' с.ш., 61°50' в.д., $H = 55$ м

ра, намного больше длины волны излучения, то всплеск появится у сигнала поляризации, что и используется при поиске косяков рыб в море. Запас плавучести указанных частиц фитопланктона из-за их размеров (нанометры) и плотности удерживает их именно на нижней границе слоя пикноклина, и они четко фиксируются в этом пограничном слое из-за больших градиентов σ_t .

На рис. 1 хорошо заметны внутренние волны с длиной волны порядка 1000–1500 м на фоне более длинных (около 5 км) волн. Амплитуды волн при этом у второй реализации примерно в два раза меньше, хотя районы зондирования достаточно близки. Чтобы ответить на вопрос, связано это с природной физикой или же с неустойчивостью работы лазерной техники, — нужны дальнейшие натурные исследования. Однако необходимо отметить, что частотные спектры колебаний в обоих случаях близки.

Лазерное зондирование осуществлялось на скорости 350 км/ч. В предыдущем эксперименте (Карское море, август 1988 г.) в определенной степени было подтверждено предположение, что глубина залегания слоя гидрозолей в морской воде соответствует глубине залегания нижней границы слоя раздела поверхностных и подповерхностных вод, идентифицируемого как нижняя граница слоя скачка плотности воды.

Другой подобный эксперимент производился в августе–сентябре 1989 г. Общая схема полетов над арктическими морями была спланирована так, чтобы максимально обеспечить выполнение всех разделов программы всеми видами наблюдений и измерений с помощью дистанционных комплексов. В целом все маршруты полетов были спланированы так, чтобы зондирование свободной ото льда ак-

ватории морей, то есть полет самолета, проходило по линии стандартных разрезов и по сетке станций, выполняемых традиционно научно-исследовательскими судами «Ледовый патруль» института. Во время проведения полетов на самолете ИЛ-18 в Карском море проходили экспедиции на НИЛ «Отто Шмидт» и НИС «Академик Шулейкин». В морях Лаптевых и Восточно-Сибирском гидрологическая съемка проводилась на НИС «Мезень». В Чукотском море в августе–сентябре работали научно-исследовательские суда «Профессор Хромов» и г/с «Дмитрий Лаптев», гидрологические данные которых тоже использовались для сравнения с лидарными измерениями с самолета.

Методика проведения частных экспериментов по калибровке самолетных измерительных комплексов, а также микромасштабные полигоны в районе айсбергов проводились по крестообразной схеме размерами примерно 10×10 км с облетами на 5–7 высотах от 30 до 200 м с центром – объект эксперимента. При этом на судах выполнялись согласно программе две (одна за другой) гидрологические станции с учащенными горизонтами.

В научных отчетах об испытании лидара [1, 2] автором данной статьи и И.Е.Фроловым была выдвинута гипотеза о фиксации лазером оптических неоднородностей в верхних слоях воды в арктических морях на уровне нижней границы слоя скачка плотности. Этими оптическими неоднородностями по той же гипотезе могут выступать взвешенные в воде частицы, которые, по-видимому, являются частицами фитопланктона. Отраженная составляющая волны когерентного излучения лазера, проходящего через верхний 35-метровый слой воды, принимается бортовым комплексом лидара, фиксируется распределение особого вида фитопланктона – нанопланктона, т.е. фиксируется глубина самых малых частиц фитопланктона и крупных бактерий размерами 3–50 мкм.

Уравнение лазерного зондирования с обобщенным учетом многократного рассеяния $P(r)$ выглядит следующим образом:

$$P(r) = Ar^{-2}\sigma_{\pi}e^{-2\sigma(r-H_0)}[1 + \delta(r - H_0)],$$

где r – радиус рассеяния; σ_{π} – коэффициент обратного рассеяния воды; σ – коэффициент ослабления излучения водой; H_0 – расстояние от самолета до воды; δ ~ добавка-вклад многократного рассеяния; A – постоянная лазера.

На измерении соотношения поляризованного $P//(r)$ и деполаризованного $P\#(r)$ сигналов на приемнике и построено лазерное зондирование аномалий (подводных оптических неоднородностей – ПОН – или гидрозолей) в морской воде.

Степень деполаризации эхо-сигнала с глубиной возрастает хотя оба компонента $P//(r)$ и деполаризованного $P\#(r)$ по интенсивности сигнала монотонно убывают с глубиной.

В первом приближении для идентификации сигналов используется знак контраста степени деполаризации. Отрицательный – отражение от зеркальной поверхности, положительный – от шероховатой, диффузной.

На первом этапе обработки данных о глубинах залегания оптических неоднородностей (ПОН) определялись средние значения глубин по различным интервалам скользящего осреднения за интервал в 5–10 мин, и рассчитывалась гистограмма этих выбранных автоматически стационарных интервалов.

Остановимся на проблеме подготовки данных измерений для дальнейшего анализа, например, по описанным выше технологиям.

Это важно в связи с получением огромного количества измерений – десятки и даже сотни тысяч единиц, как, например, при дистанционном лазерном зондировании поверхностного слоя океана с самолета-лаборатории. Импульсный лазер выдает по десять «выстрелов» в секунду. В связи с этим измерения имеют стохастический характер отраженного от подводных оптических неоднородностей (гидрозолей) – обычно это фитопланктон (нанопланктон) – оптического сигнала.

Функции пропускания атмосферы, шумы в электронном тракте, частотные и фазовые искажения при передаче наносекундных импульсов по электрическим цепям – все эти факторы обуславливают необходимость применения статистических методов для анализа временных рядов измеряемых глубин оптических неоднородностей, которые связываются с глубиной залегания слоя скачка плотности.

В условиях априорной неопределенности вида функции распределения сигналов лазера и ее параметров использовались непараметрические методы теории статистических решений. Непараметрической статистикой называют некоторую функцию случайной величины с неизвестным распределением. Выбирается некоторая функция, которая обладает некоторым известным распределением, свойства которой некоторым образом характеризуют свойства неизвестного распределения исходной случайной величины. Зная распределение непараметрической статистики, можно с его помощью проверить гипотезы о некоторых свойствах неизвестных распределений. К таким свойствам, в частности, относится нормальность, стационарность, наличие выпадающих (сбойных) точек, независимость или коррелированность наблюдений и т.п.

Одной из самых мощных статистик является статистика Кендала (обобщенная инверсия второго порядка) [4]:

$$T^{2\Sigma} = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n u(y_i - y_k), \quad (1)$$

где $u(y_i, y_k) = 1$, если $y_i \geq y_k$ и $u(y_i, y_k) = 0$, если $y_i < y_k$. Это элементарная инверсия.

Распределение статистики Кендала является биномиальным с объемом выборки $n(n-1)$.

Среди наиболее употребляемых непараметрических статистик выделяются знаковые, ратовые, порядковые и различные комбинации на их основе. Статистику Кендала можно использовать для проверки гипотез о вероятностных способах нестационарных наблюдений.

Ввиду отсутствия априорной информации первая задача, которая решается, – это классификация и разделение данных на статистически однородные интервалы квазистационарности. Знание стационарных свойств данных измерений и длительности интервалов стационарности имеет важнейшее значение, т.к. эти интервалы являются интервалами сжатия данных, сглаживания и обработки.

С использованием $T_i^{2\Sigma}$ -статистики производится деление данных на временные интервалы, для которых с наперед заданной вероятностью α оценки средних значений и дисперсии постоянны. Помимо задач классификации и разделения данных с использованием инверсионных методов, производится контроль и идентификация трендов на каждом из интервалов квазистационарности (возрастание и убывание трендов на интервале: вогнутый, выпуклый, колебательный и т.п.).

Метод позволяет за один цикл обработки обнаружить и выделить разнородные интервалы, объединив их в две группы однородных по некоторым признакам интервалов – группы стационарных и нестационарных интервалов.

Метод основан на последовательной процедуре проверки статистических гипотез с вычислением текущих обобщенных инверсий второго порядка $T_i^{2\Sigma}$ и

допустимых границ $T_{\min}^{2\Sigma} \left[i; 1 - \frac{\alpha}{2} \right]$ и $T_{\max}^{2\Sigma} \left[i; \frac{\alpha}{2} \right]$. Границы интервалов стационарности определяются абсциссой nk_{cm} , $k = 1, 2, \dots, K$, соответствующей объему выборки данных измерений в точке пересечения линии текущих суммарных инверсий $T_i^{2\Sigma}$ с допустимыми кривыми $T_{\max, \min}^{2\Sigma} [i; \alpha]$, определяющими область G_0 (рис. 2) принятия гипотезы H_0 стационарности.

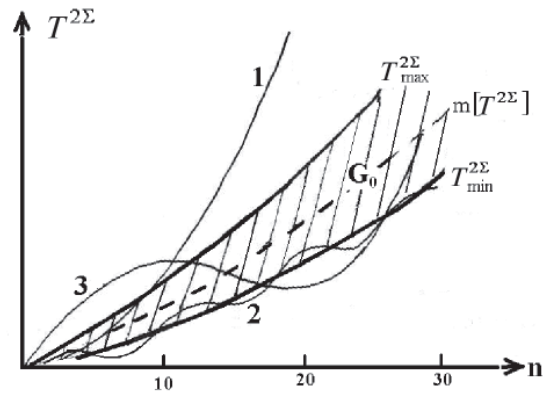


Рис. 2. Связь типов трендов с поведением обобщенных инверсий:

A – кривая **1** обобщенных инверсий пересекает только одну из допустимых границ $T_{\max}^{2\Sigma}$ или $T_{\min}^{2\Sigma}$ и только однажды; B – кривая **2** пересекает постоянно одну из допустимых границ $T_{\max}^{2\Sigma}$ или $T_{\min}^{2\Sigma}$; B – кривая **3** пересекает последовательно каждую из допустимых границ $T_{\max}^{2\Sigma}$ или $T_{\min}^{2\Sigma}$

При проверке гипотезы H_0 можно получить характерные случаи из комбинаций пересечений $T_i^{2\Sigma}$ с $T_{\max, \min}^{2\Sigma} [i; \alpha]$, как это показано на рис. 2.

Каждой из комбинаций $T_i^{2\Sigma}$ соответствуют типы временных рядов (или трендов). Так, для случая A (рис. 2) характерны монотонно возрастающие и убывающие временные ряды данных; для случая B (рис. 2) – ряды с периодическими трендами, симметричными относительно своего математического ожидания. Случай B (рис. 2) соответствует временным рядам со смешанными трендами, составляющими аддитивную смесь из двух упомянутых типов трендов.

Алгоритм реализует критерий нестационарности, заданный выражением

$$T_{\max}^{2\Sigma} \left[i; \frac{\alpha}{2} \right] < T_i^{2\Sigma} < T_{\min}^{2\Sigma} \left[i; 1 - \frac{\alpha}{2} \right].$$

При поступлении из блока ввода исходных данных текущих измерений y_i в схему сравнения отсчетов в ней формируются, в соответствии с решающим правилом (1), последовательности элементарных инверсий. Последние служат для вычисления вспомогательных рядов обобщенных инверсий $T_i^{2\Sigma}$.

Одновременно для заданной величины уровня значимости α в соответствии с методикой вычисления допустимых границ находятся $T_i^{2\Sigma} \left[i; \frac{\alpha}{2} \right]$ и $T_{\min}^{2\Sigma} \left[i; 1 - \frac{\alpha}{2} \right]$.

Значения $T_i^{2\Sigma}$ и $T_{\max, \min}^{2\Sigma} [i; \alpha]$ сравниваются в блоках сравнения, в которых проверяется выполнение простых неравенств – критерия стационарности:

$$T_i^{2\Sigma} \leq T_{\max}^{2\Sigma} \left[i; \frac{\alpha}{2} \right], \quad T_i^{2\Sigma} \geq T_{\min}^{2\Sigma} \left[i; 1 - \frac{\alpha}{2} \right]. \quad (2)$$

И двух неравенств – критерия нестационарности:

$$T_i^{2\Sigma} > T_{\max}^{2\Sigma} \left[i; \frac{\alpha}{2} \right], \quad T_i^{2\Sigma} < T_{\min}^{2\Sigma} \left[i; 1 - \frac{\alpha}{2} \right]. \quad (3)$$

Критерий нестационарности принимается, если выполняются неравенства

$$T_{\max}^{2\Sigma} \left[i; \frac{\alpha}{2} \right] \geq T_i^{2\Sigma} < T_{\min}^{2\Sigma} \left[i; 1 - \frac{\alpha}{2} \right] \quad (4)$$

или

$$T_{\max}^{2\Sigma} \left[i; \frac{\alpha}{2} \right] < T_i^{2\Sigma} \geq T_{\min}^{2\Sigma} \left[i; 1 - \frac{\alpha}{2} \right]. \quad (5)$$

Параллельно поступает информация о типе тренда и о числе однородных интервалов, принадлежащих к одному множеству.

Формирование интервалов $n_{нест}$ прекращается в момент нарушения неравенств (4) или (5), т.е. линия инверсий $T_i^{2\Sigma}$ вновь возвращается в область G_0 , для которой справедливы неравенства (2) и т.д.

Таким образом, применяя метод последовательных пересечений, можно получить результаты обработки временного ряда, удовлетворяющие критериям однородности по различным статистическим параметрам. В этом случае ряд будет представлен совокупностью трех типов однородных множеств, состоящих из интервалов: стационарности, нестационарности с выпуклым трендом, с вогнутым трендом и т.п.

Как уже указывалось, калибровка лидарного комплекса производилась с помощью научно-исследовательских судов ААНИИ.

Возвращаясь к анализу калибровки лазера к западу от полуострова Ямал, необходимо отметить одно очень важное обстоятельство: по измерениям с судна максимальный вертикальный градиент плотности воды в слое скачка в этом рай-

оне велик и равен $\left(\frac{\partial \sigma_t}{\partial z} \right)_{\max} \approx 0,6$.

Ниже этого слоя расположен нижний пограничный слой слоя скачка плотности, который зафиксировал лидар многократными устойчивыми всплесками на деполаризованных эхо-сигналах с отклонением от измерений с судна на 3–4 м ($\Delta = 3-4$ м). С учетом точности фиксации горизонтов на станциях на волнении 2–3 м это почти полное совпадение.

Из большого числа гидрологических станций, выполненных судами, с маршрутами полетов совпали по месту около 140 станций. Они были использованы для сравнения с данными лидарного зондирования.

Эхо-сигналы лазера были обработаны на ЭВМ по алгоритмам непараметрических методов теории принятия решений.

Затем эти данные, по отдельности для поляризованного и деполаризованного каналов, были нанесены на карты соответственно маршрутам полетов.

На эти карты глубин залегания нижней границы слоя скачка, полученных по лидарным данным, были нанесены те же глубины нижней границы слоя скачка, полученные независимо по данным вертикального распределения плотности воды на гидрологических станциях, выполненных указанными научно-исследовательскими судами.

На основе этих карт, считая гидрологические данные реперными, несмотря на большие отклонения по времени (10–20 дней) некоторых гидрологических измерений от лидарного зондирования, были построены карты отклонений — ошибок. Эти карты представлены на рис. 3.

На карты нанесены только те маршруты полетов, где были выполнены гидрологические станции. Полностью зачерненные части маршрута — это места, где глубины залегания нижней границы слоя скачка плотности, измеренные лидарным зондированием с самолета, практически полностью совпадают ($\Delta = 0-5$ м), с точнос-

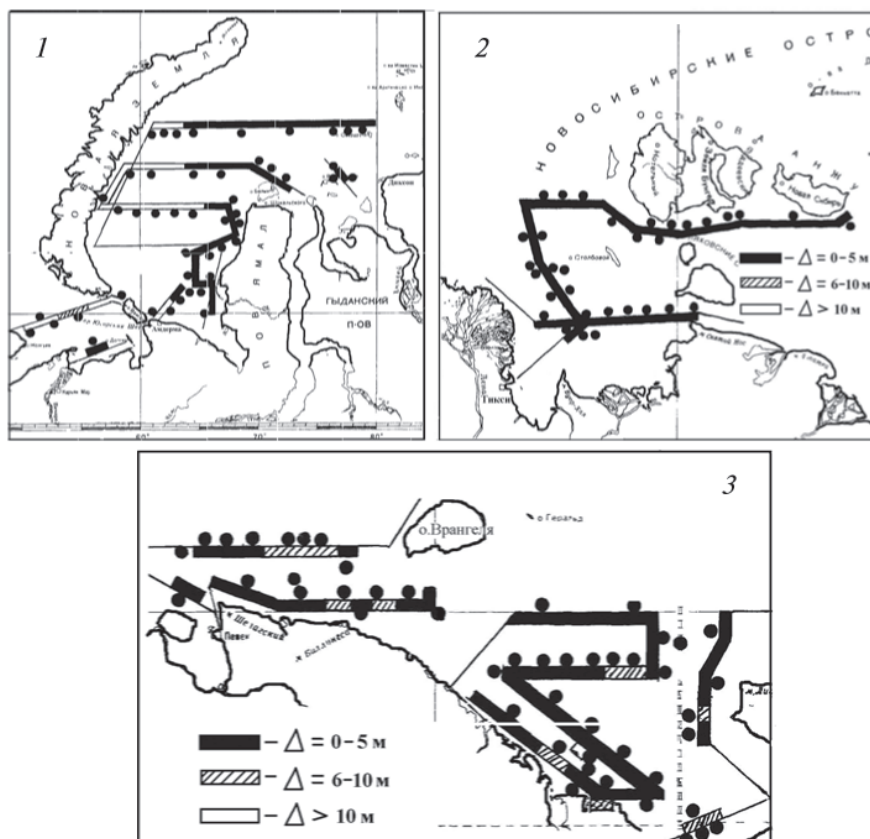


Рис. 3. Отклонения значений глубин слоя скачка плотности Δ , измеренных лидаром, от прямых измерений с судна в Карском море (1), Лаптевых и Восточно-Сибирском (2) и Чукотском (3) в августе 1989 г.

тью до ошибок фиксации горизонтов, с такими же характеристиками по гидрологическим станциям. Заштрихованные косой линейкой части маршрута обозначают места, где $\Delta = 5-10$ м.

На этих же картах черными кружочками указаны места выполнения гидрологических станций судами, с которыми производилось сравнение. По картам отклонений Δ хорошо видна география точности фиксации лидаром в некоторых районах нижней границы слоя скачка плотности.

Достаточно резко выделяется район западной части Карского моря, где велики ($\Delta > 10$ м) отклонения лидарных и гидрологических данных. Далее на восток совпадение полное, а в районах Восточно-Сибирского и Чукотского морей местами видны отклонения $\Delta = 5-10$ м, в остальном же здесь тоже полное совпадение.

Необходимо указать, что для этого района характерна большая разница по времени выполнения лидарного зондирования и многих гидрологических станций.

Из табл. 1 видно, что с большими отклонениями $\Delta > 10$ м — всего 13 % гидрологических станций. Остальные 87 % гидрологических станций (116 станций) в целом подтверждают измерения лидаром в районе этих станций. При этом хорошо заметно четкое разделение отклонений Δ по районам, которое, как мы

Таблица 1

**Отклонения глубин скачка плотности, измеренных лидаром
и по данным гидрологических станций, выполненных судами
по маршрутам, нанесенным на рис. 3**

Отклонения Δ (м)	0–5	5–10	> 10
Карское море (карта 1)			
Число станций	34	10	15
%	58	17	25
Море Лаптевых и Восточно-Сибирское море (карта 2)			
Число станций	49	23	2
%	66	31	3
Восточно-Сибирское и Чукотское моря (карта 3)			
Число станций	83	33	17
%	62	25	13

увидим далее, связано с особенностями водных масс, находящихся в различных районах. Они по своим оптическим свойствам, точнее, наличием подводных оптических неоднородностей (ПОН) в морской воде, определяют физику прохождения лазерного излучения в среде и ошибки в измерениях максимальных градиентов плотности. Необходимо отметить, что в статистику для сравнения с лидарными данными не вошли гидрологические станции, выполненные с борта НИЛ «Отто Шмидт» в северо-западной части Карского моря, поскольку по результатам калибровки лидара в этом районе и самими гидрологическими станциями видно, что сравнение их в этом районе невозможно. Попытаемся объяснить, с чем связаны указанные отклонения Δ . Возвращаясь к предыдущему разделу, обратим внимание на то, что из трех калибровок на двух (около Ямала – НИС «Академик Шулейкин» и в Чукотском море – г/с «Дмитрий Лаптев») было полное совпадение при больших значениях максимальной величины вертикального градиента

$$\text{плотности воды} \left(\frac{\partial \sigma_t}{\partial z} \right)_{\max} > 0,2.$$

При третьей калибровке к северу от мыса Желания, выполняемой совместно с ледоколом «Отто Шмидт», отклонение лидарных от гидрологических данных по слою скачка плотности очень велики $\Delta \sim 20$ м, если это можно считать слоем

$$\text{скачка, поскольку величина максимального градиента очень мала} \left(\frac{\partial \sigma_t}{\partial z} \right)_{\max} \approx 0,02.$$

Заметна тенденция: при малых значениях градиента плотности воды в слое скачка отклонение велико, а при больших градиентах – совпадение практически полное.

Для точного выяснения вопроса были вычислены величины максимальных градиентов плотности воды для семидесяти гидрологических станций из числа использованных для сравнения с лидарными данными, в основном западного сектора Арктики.

На рис. 4 представлен график распределения этих градиентов плотности по станциям в зависимости от величин отклонений глубин залегания нижней границы слоя скачка плотности воды по лидарным измерениям и гидрологическим станциям. Заметна концентрация небольших отклонений ($\Delta < 5$ м) в пределах

$$\left(\frac{\partial \sigma_t}{\partial z} \right)_{\max} = 0,15 - 0,55 \text{ (ед/м)} - \text{условных единиц плотности на один метр. Резко и обособленно расположены на графике большие отклонения} (\Delta < 14 \text{ м}) \text{ при малых}$$

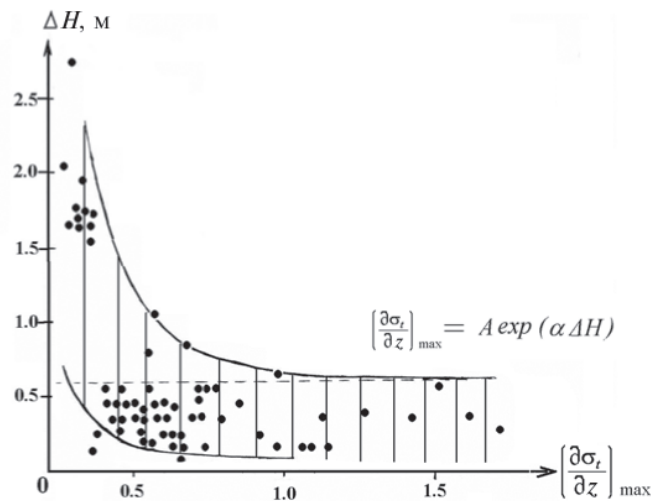


Рис. 4. Распределение отклонений ΔH нижней границы слоя скачка плотности воды по контактному измерению (гидрологические станции) и дистанционного зондирования (лазером с самолета) в зависимости от максимального градиента плотности воды $\left(\frac{\partial\sigma_t}{\partial z}\right)_{\max}$

значениях градиента $< 0,15$ (ед/м). Приближенно зависимость ошибки Δ определения по лидару глубины слоя скачка от величины градиента плотности воды можно выразить как

$$\Delta = f\left(1/\frac{\partial\sigma_t}{\partial z}\right) \text{ или } \Delta = K\left(1/\frac{\partial\sigma_t}{\partial z}\right), \text{ где } K = Ae^{-\lambda_2}e^{\lambda_1}.$$

Здесь λ_1 и λ_2 – декрименты затухания функции, A – коэффициент, зависящий от глубины залегания слоя скачка плотности.

В дальнейшем возможно уточнение параметров зависимости Δ от $\frac{\partial\sigma_t}{\partial z}$ при наличии большего числа калибровок, а также новых гидрологических съемок в морях при параллельном дистанционном зондировании верхнего слоя воды арктических морей. В заключение необходимо отметить, что запись профиля нижней границы слоя скачка плотности воды, измеренной с помощью лидара, идет практически непрерывно, с дискретностью 0,5–1 с. Это дает возможность исследовать мезоструктуру и даже микроструктуру этой условной поверхности на больших акваториях, при этом с очень большой скоростью в различных масштабах ее пространственного распределения в арктических морях от микро до синоптических.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бензман В.Ю., Фролов И.Е., Гутниченко В.И. Научно-технический отчет о работе на самолете-лаборатории ИЛ-18, август 1988 г. Фонды ААНИИ. О-3689. 1988. 25 с.
2. Бензман В.Ю. Научно-технический отчет о работе на самолете-лаборатории ИЛ-18, июнь 1989 г. Фонды ААНИИ. О-3690. 1989. 12 с.
3. Бензман В.Ю. Научно-технический отчет о работе на самолете-лаборатории ИЛ-18, август–сентябрь 1989 г. Фонды ААНИИ. О-3691. 1989. 86 с.
4. Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. М.: Наука, 1973. 899 с.
5. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 551 с.

6. *Benzeman V.Yu.* Mezostructure of water density maximal gradients boundary layer relied in arctic seas by lidar sensing data. Rapport Nr. 97. Norsk PolarInstitutt, Oslo, 1997. P. 92–95.

V.YU.BENZEMAN

**MEASURING THE DEPTH OF DENSITY MAXIMAL GRADIENTS LAYER
BY LIDAR SENSING DATA**

The paper describes the experiments on laser sounding of the water upper layer in the Arctic seas in August-September, 1988–1989, using the air-borne lidar device. The experiments are based on verifying the idea of I.Ye.Frolov and the author of the present paper on the possibility to register the depth of density maximal gradients layer using the laser sounding from board the air-plane.

Key words: density maximal gradient layer, laser sounding