

Гидрологические исследования в Арктике

Е.Г. Морозов

Фото сделано в 2007 г. при прохождении Карских Ворот

Характерные черты Арктики с точки зрения гидрофизики

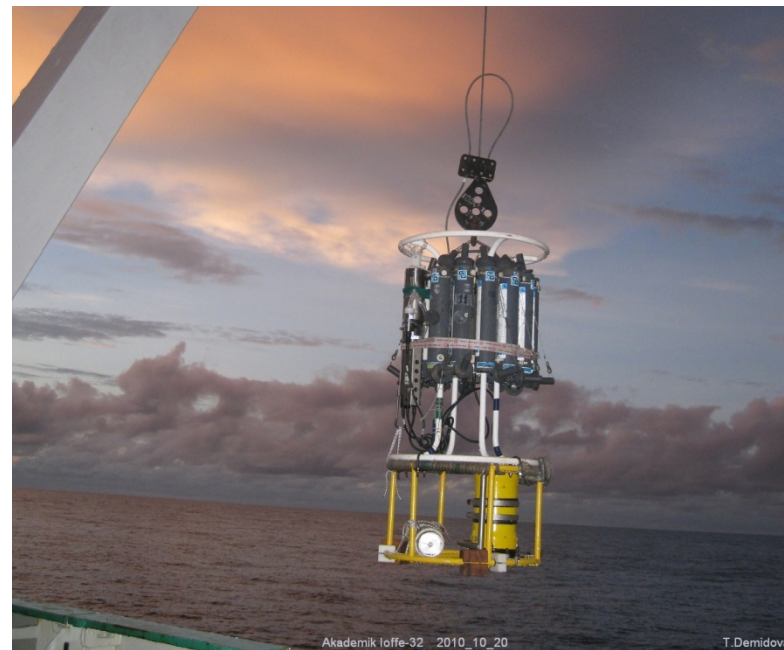
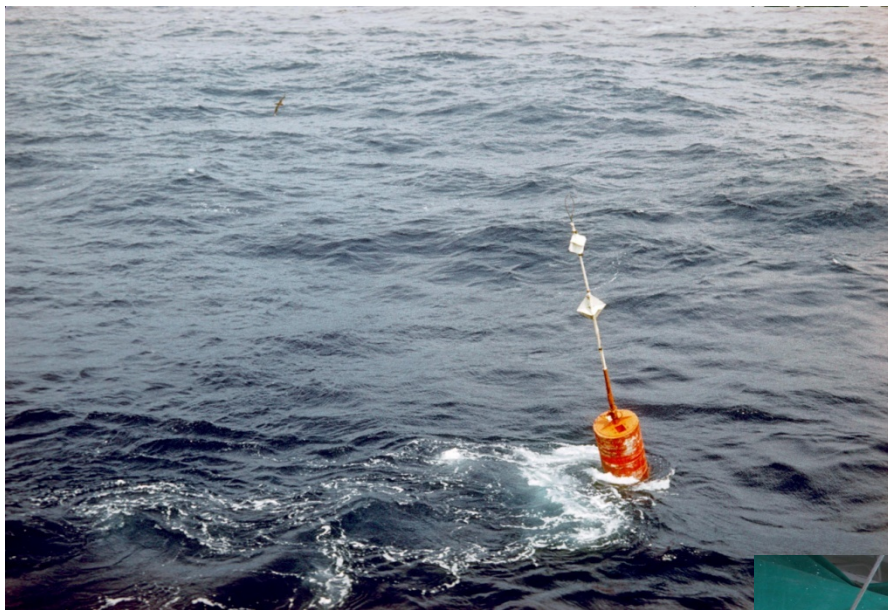
Холодно, лед

Широкий шельф

Критические широты для внутренних волн

Термоклин: снизу теплее, сверху холоднее

Техника эксперимента



Приливные внутренние волны в Арктике

Что такое внутренний прилив?

Внутренний прилив – это обычная внутренняя волна с приливной частотой.

Приливные течения набегают на подводные склоны. За счет этого появляется периодическая (12.4 часа) вертикальная составляющая. Вертикальные течения смещают изопикны и возникает внутренняя волна.

Приливная внутренняя волна – это волна высокой энергии.

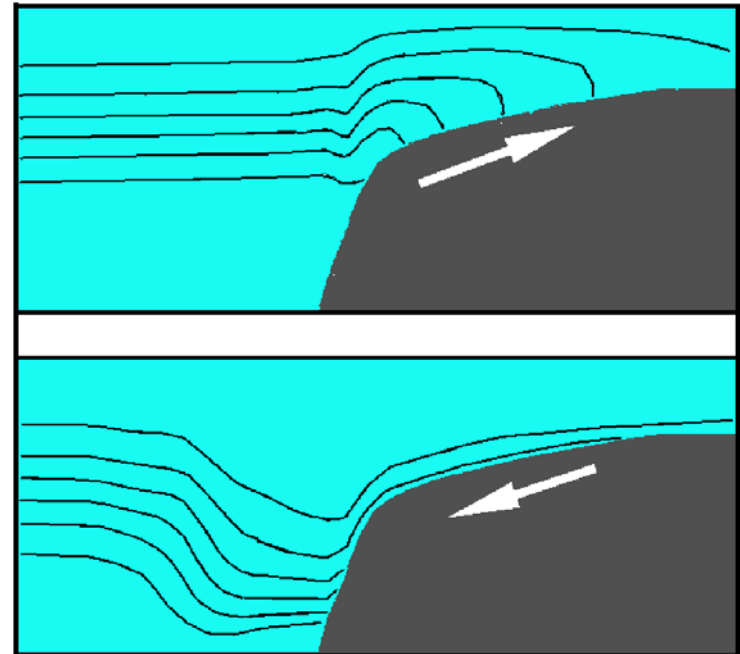


Схема возмущения изопикнических поверхностей приливными течениями на склоне

Критические широты 74°N

Рассмотрим идеализацию

Уравнение для вертикальной скорости внутренней волны **при плоском дне и отсутствии среднего течения.**

Нулевые вертикальные скорости на поверхности и дне.

$$\frac{d^2 w}{dz^2} + \frac{N^2(z) - \omega^2}{\omega^2 - f^2} k^2 w = 0$$

При такой упрощенной постановке:

на широте около 74° частота прилива M2 (12.4 час) становится равна частоте Кориолиса и уравнение не имеет осциллирующих решений.

Однако течения прилива продолжают набегать на склоны.

Неровное дно или неровная подледная поверхность могут приводить к возникновению вертикальных составляющих и к пикам на частоте M2.

Средняя завихренность может также сдвигать критическую частоту.

Если внутренняя волна нелинейная, то она может существовать на частоте M2 севернее критической широты.

Если учитывать все компоненты вектора вращения Земли, то запрет снимается.

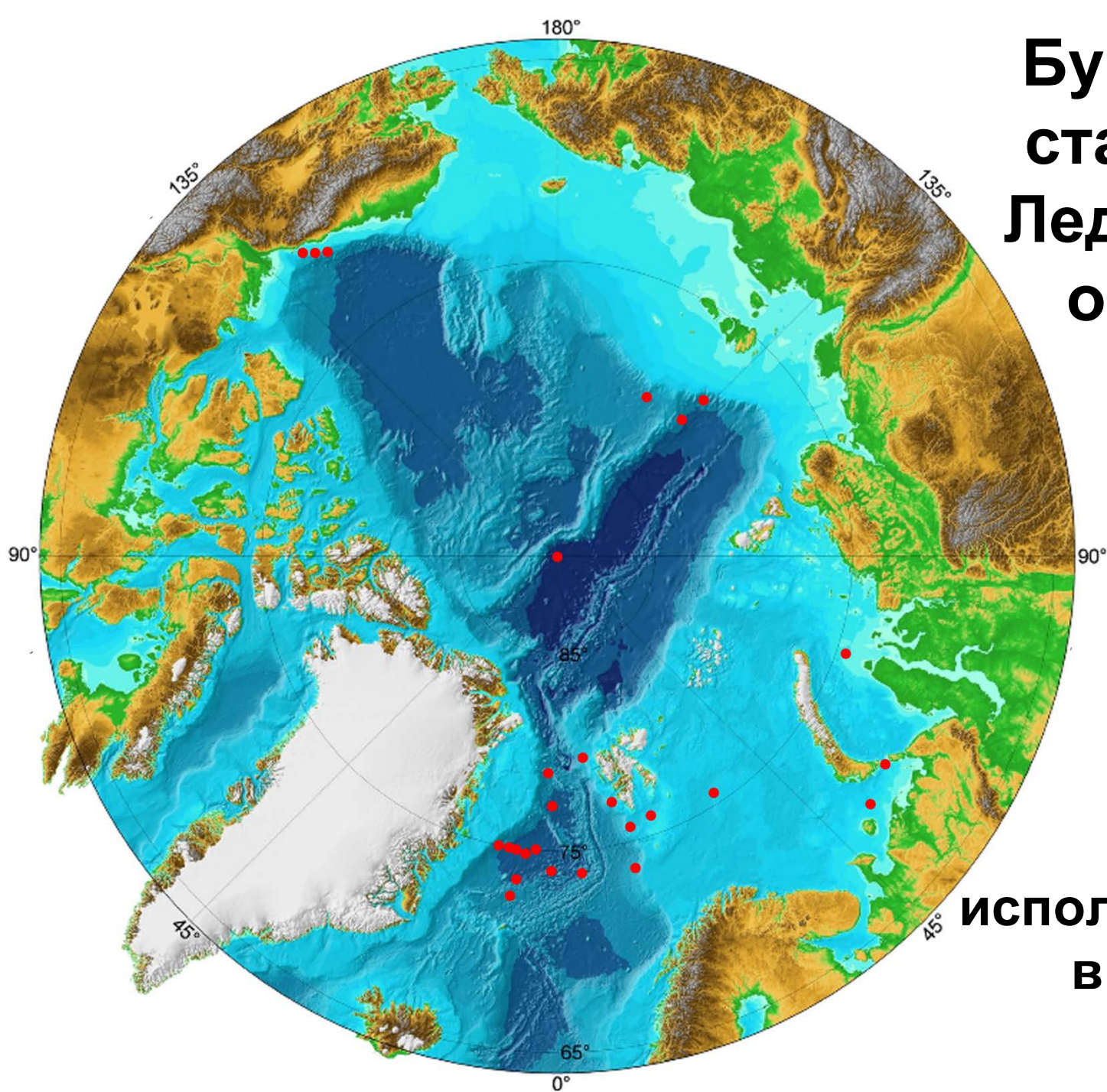
Волны с периодом 12.4 часа фиксировались много севернее критической широты.



**Поверхность
подо льдом
очень
неровная,
есть торосы
и «сосульки-
сталактиты»**

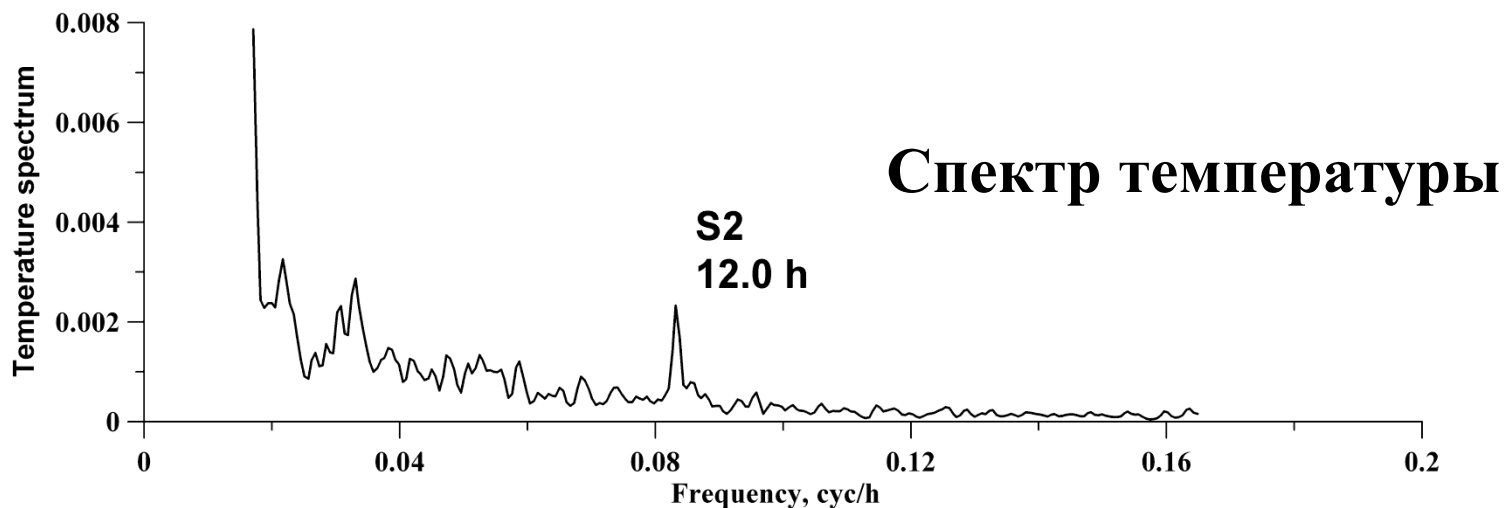
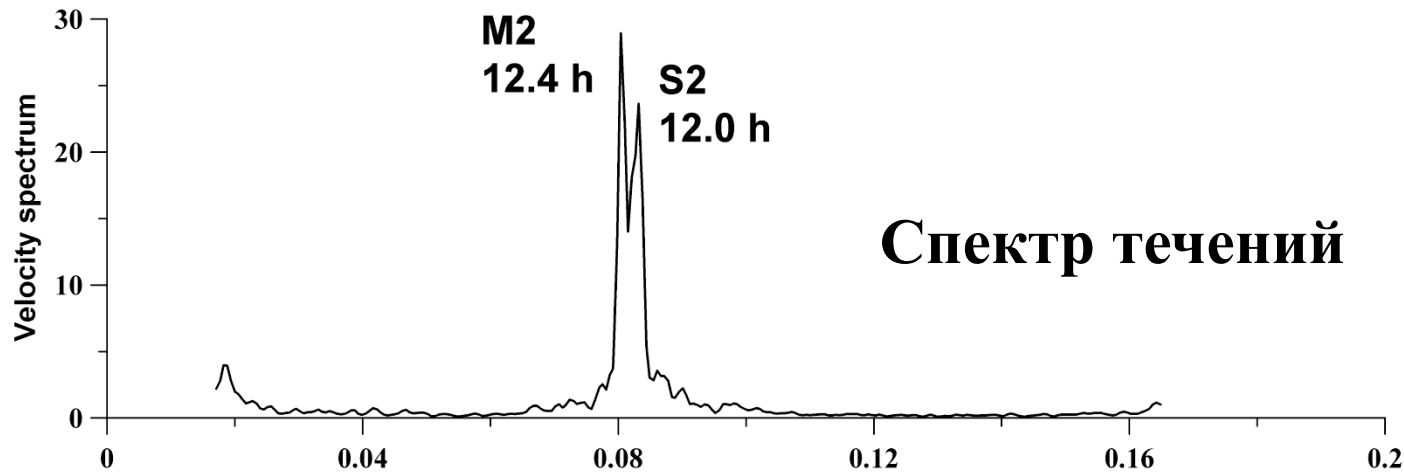
Фото В. Грищенко

**Буйковые
станции в
Ледовитом
океане,**



**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ
в работе**

Спектр колебаний течений и температуры по данным на буе подо льдом на широте 81°N, глубина прибора 712 м над глубиной океана 1700 м



Задача – получить карту амплитуд внутренних приливных волн в Арктике

Решаем на основе численного моделирования с привязкой к наблюдениям на буях

Численная модель разработана В.И. Власенко.

E.G. Morozov, K. Trulsen, M.G. Velarde, and V.I. Vlasenko,
Internal tides in the strait of Gibraltar,
J. Phys. Oceanogr., **32**, 3193-3206, 2002.

V. Vlasenko, N. Stashchuk, K. Hutter,
Baroclinic Tides, Cambridge Univ. Press, 2005.

Численная модель

Модель двумерная (x,z) для многослойного вращающегося океана:

$$\Omega_t + J(\Omega, \Psi) - fV_z = \frac{g\rho_x}{\rho_0} + K(x)\Omega_{xx} + K\Omega_{zz} + (K\Psi_{zz})_z$$

$$V_t + J(V, \Psi) + f\Psi_z = K(x)V_{xx} + (KV_z)_z$$

$$\rho_t + J(\rho, \Psi) + \frac{\rho_0 N^2(z)}{g}\Psi_x = R(x)\rho_{xx} + (R\rho_z)_z + (R\rho_{0z})_z$$

здесь Ψ функция тока ($\Psi_z = u$; $\Psi_x = -w$) $\Omega = \Psi_{xx} + \Psi_{zz}$ завихренность.

J - якобиан

Модель нелинейная, негидростатическая.

Модель двумерная, но вводится уравнение для компоненты скорости V по нормали к плоскости x,z , чтобы учесть вращение.

Компонента V изменяется только в плоскости x,z , но не меняется по оси y .

Рабочее поле длиной 80 км; 40 слоев; шаг по горизонтали 50 м.

Граничные условия

Граничные условия на поверхности $z = 0$ нулевые

$$\rho_z = 0, \quad \Omega = 0, \quad \Psi = 0$$

Граничные условия на дне: непротекание

Возмущение (forcing) задается периодической функцией тока, то есть прилив.

$$z = -H(x), \quad \partial\rho / \partial n = 0, \quad \Psi = \Psi_0 \sin \omega t$$

Ψ_0 - перенос масс баротропным приливом

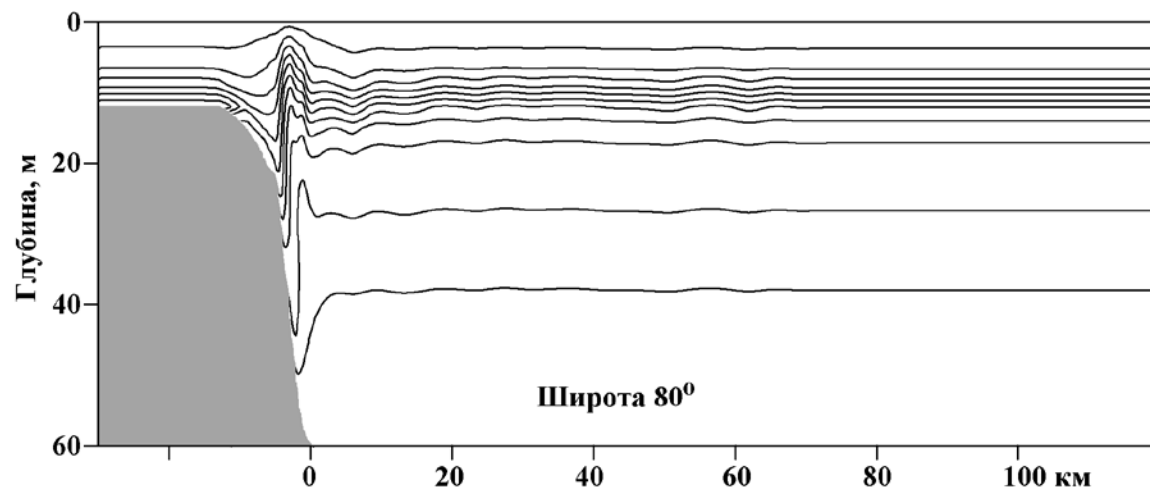
Граничное условие для завихренности на дне задается уравнением

$$\omega = \Delta\Psi$$

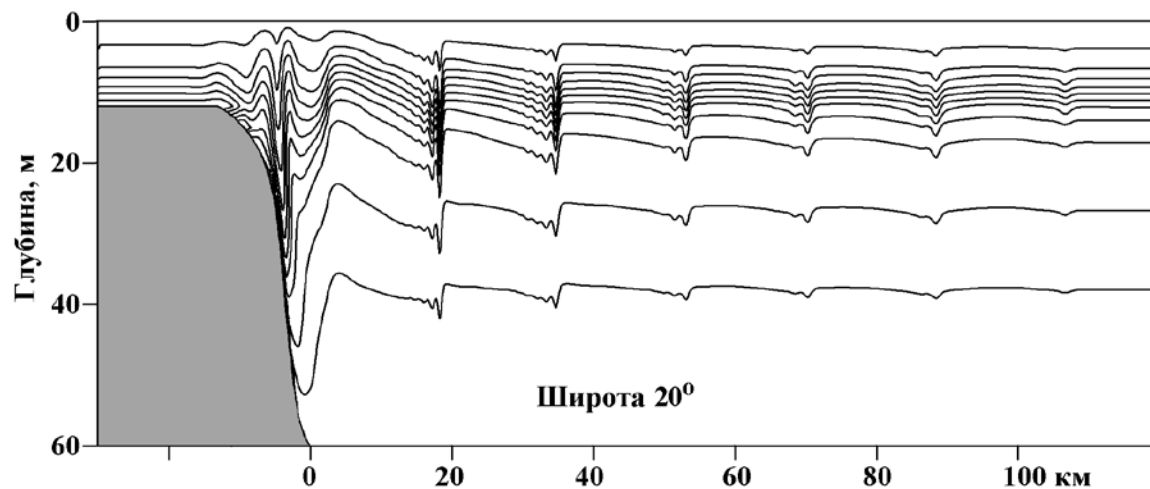
Значение поля функции тока рассчитывается на предыдущем шаге

На жидких боковых границах граничные условия нулевые.
Расчет начинается из состояния покоя и прекращается когда возмущения доходят до границ.

Сравнение моделирования внутреннего прилива M2 для широт 80° и 20°



80°

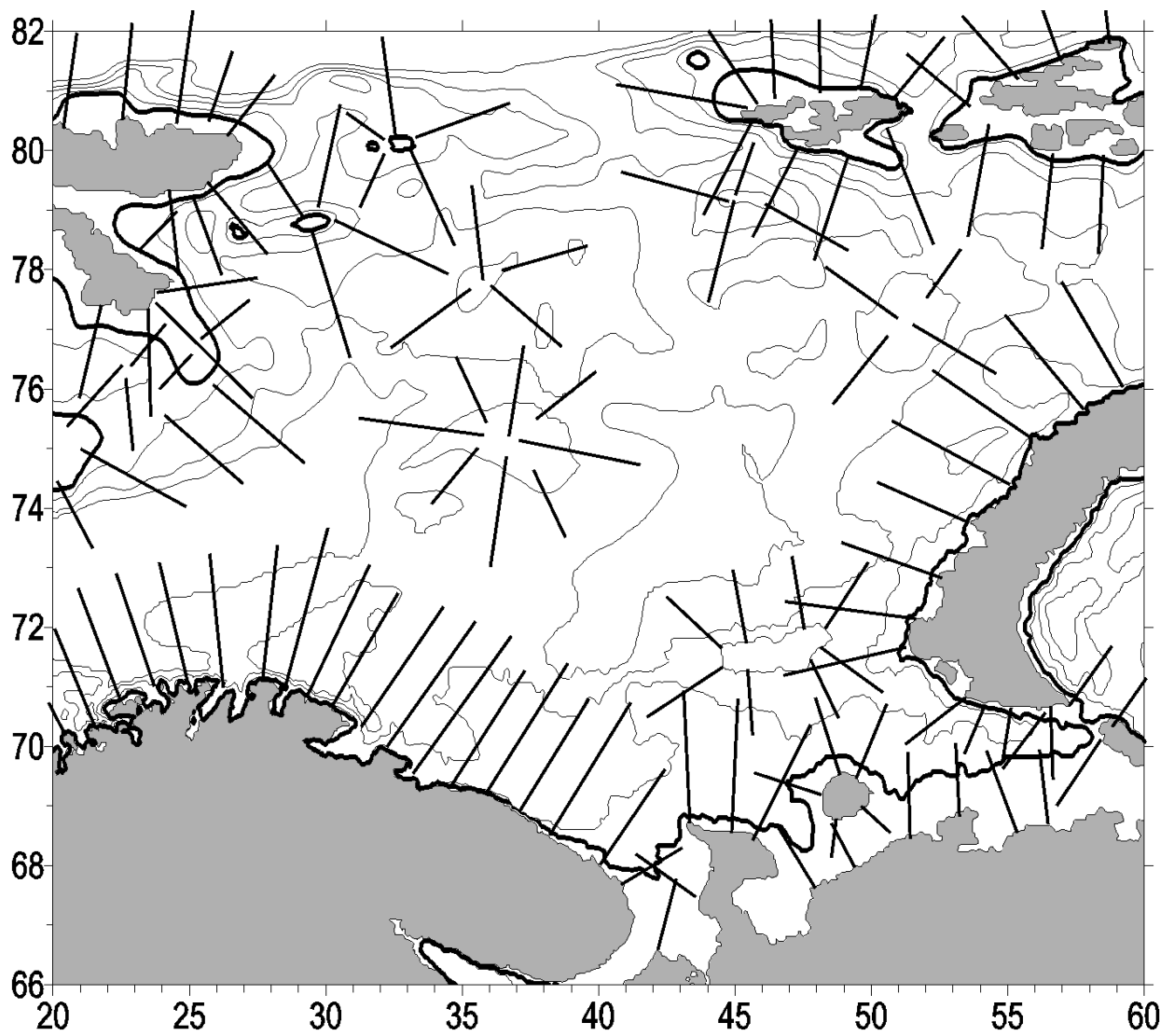


20°

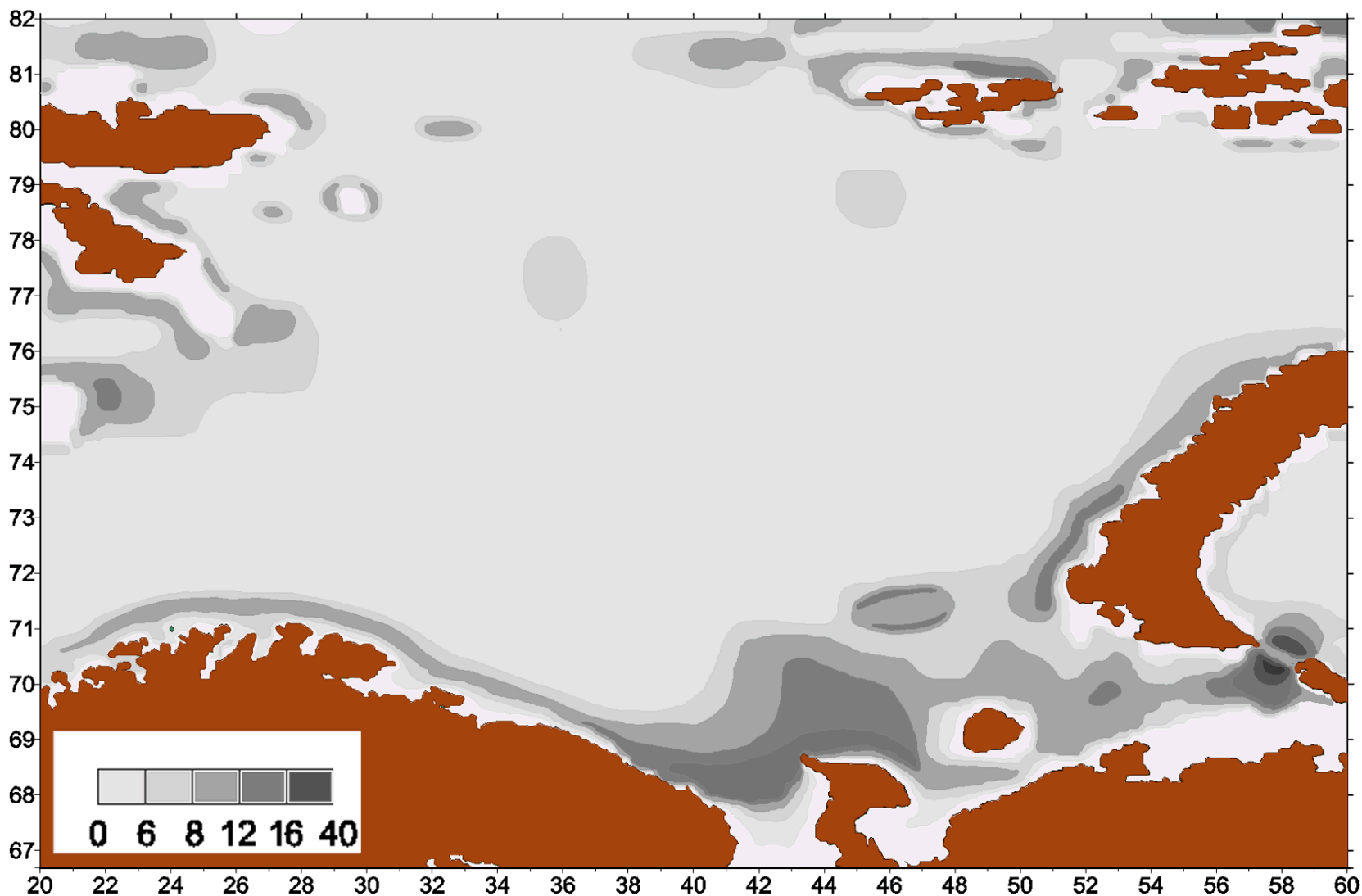
Схема расчетов для Баренцева моря

Береговые склоны делились на полосы для проведения расчетов по модели.

Считалось, что изменения амплитуд внутреннего прилива вдоль берега много меньше, чем по нормали к берегу.



Амплитуды внутреннего прилива в Баренцевом море



Сравнение с картой мутности

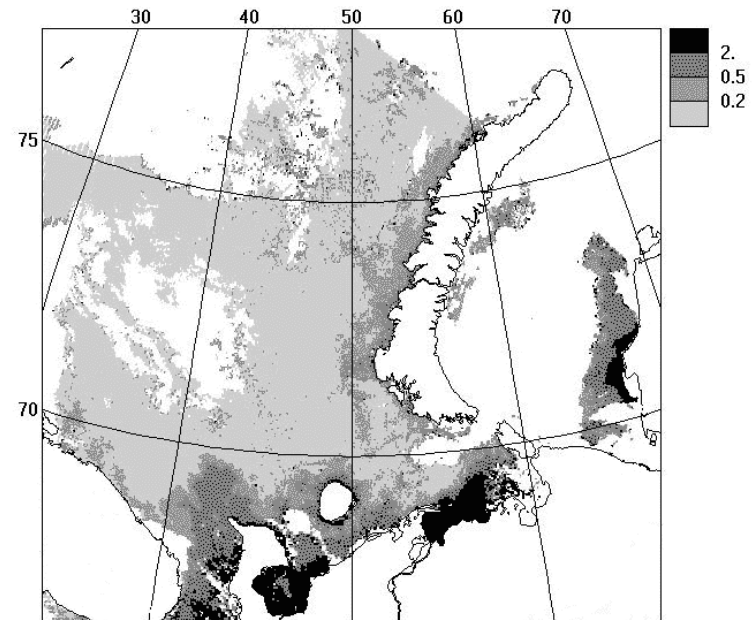
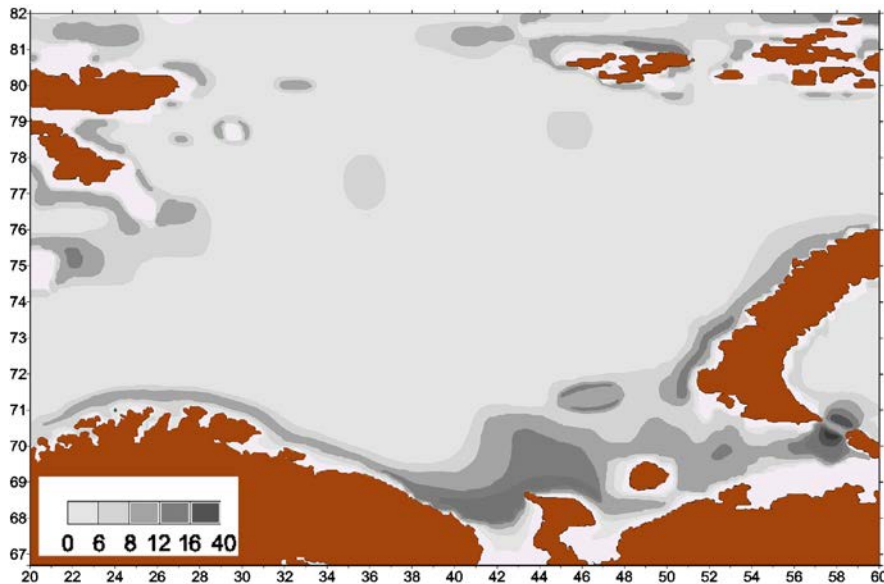
Снимки цвета моря со спутника SeaWiFS.

Мутность определяется концентрацией взвеси.

Градации: 2, 1, 0 мг/литр.

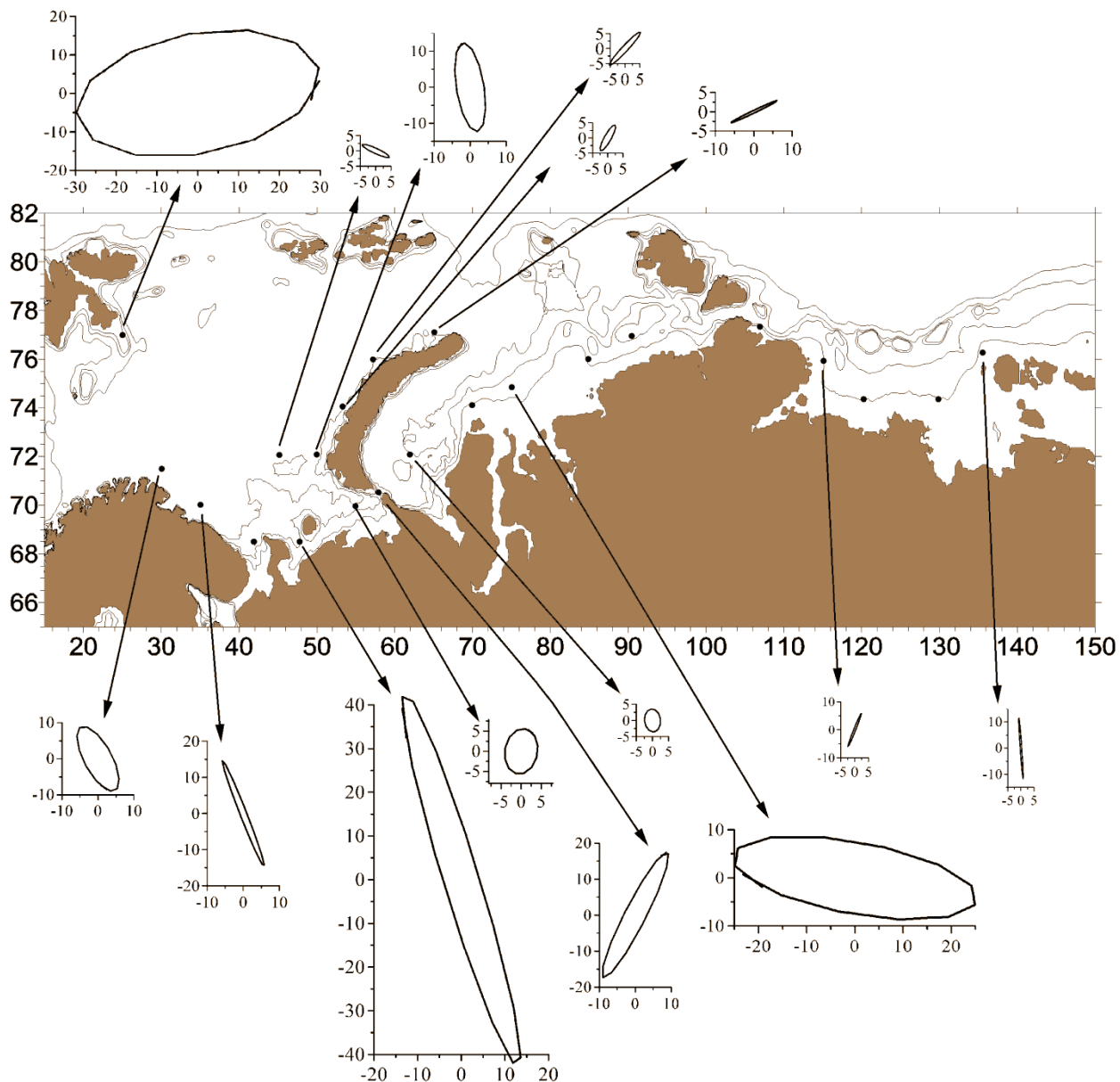
Донные течения, вызванные внутренними волнами, увеличивают количество взвеси в мелком море.

Спутниковый снимок из работы В. Буренков, С. Ершова, О. Копелевич, С. Шеберстов и В. Шевченко, Океанология, 2001 г.

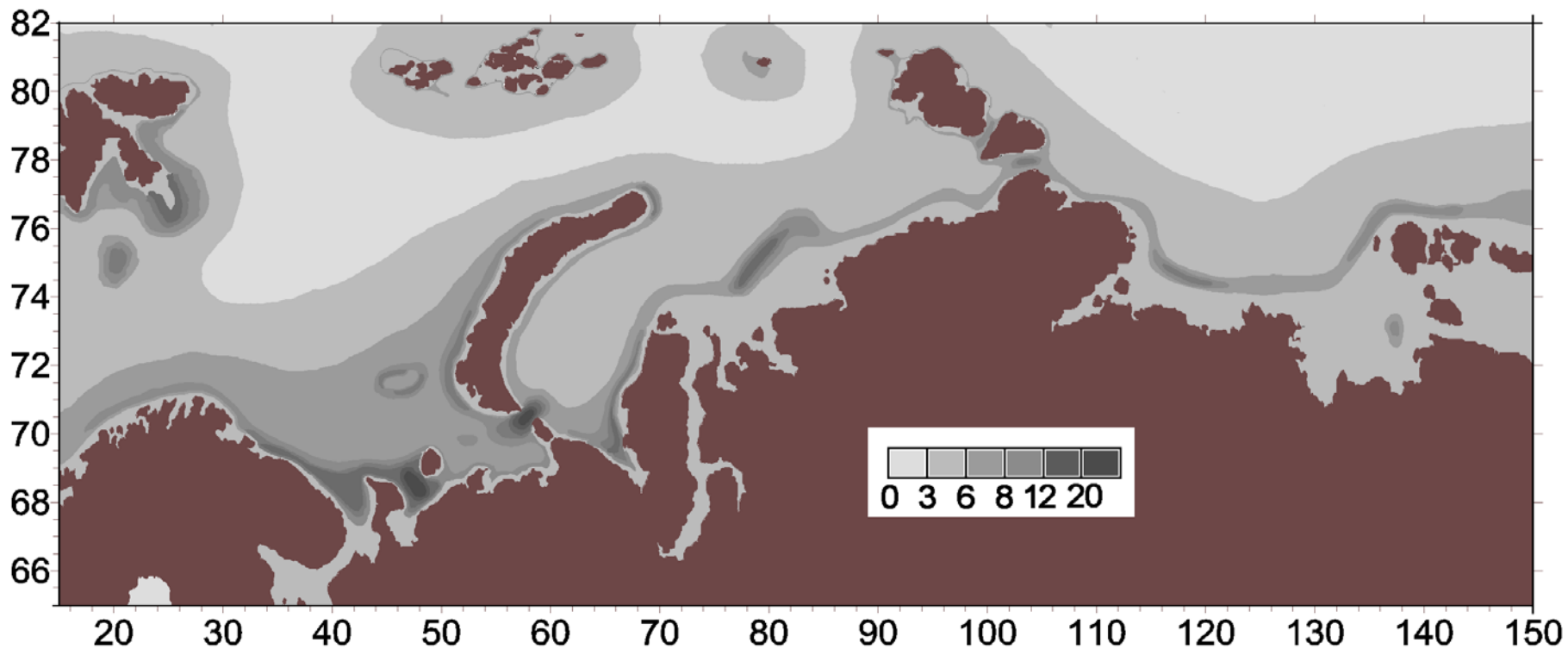


**Эллипсы
баротропного
прилива в
Арктике**

**Рассчитаны
по
спутниковой
альтиметрии**

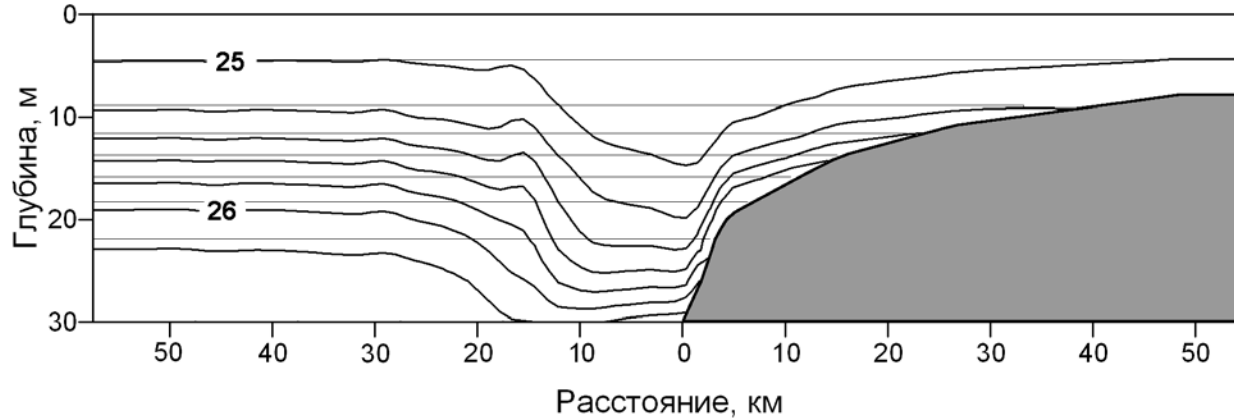


Карта амплитуд баротропного прилива в Арктике

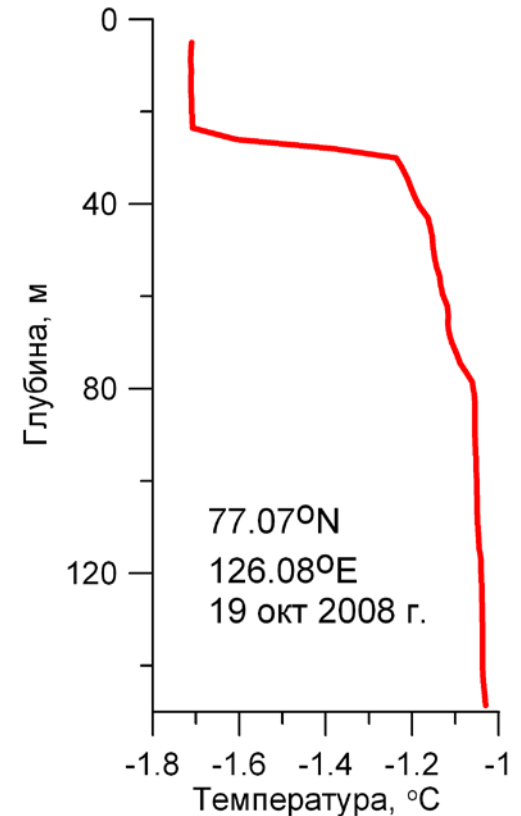




Колебания изопикн, вызванные внутренними волнами



Искривление изопикнических поверхностей приливными течениями



Температура, температура замерзания и плотность. Вертикальные распределения

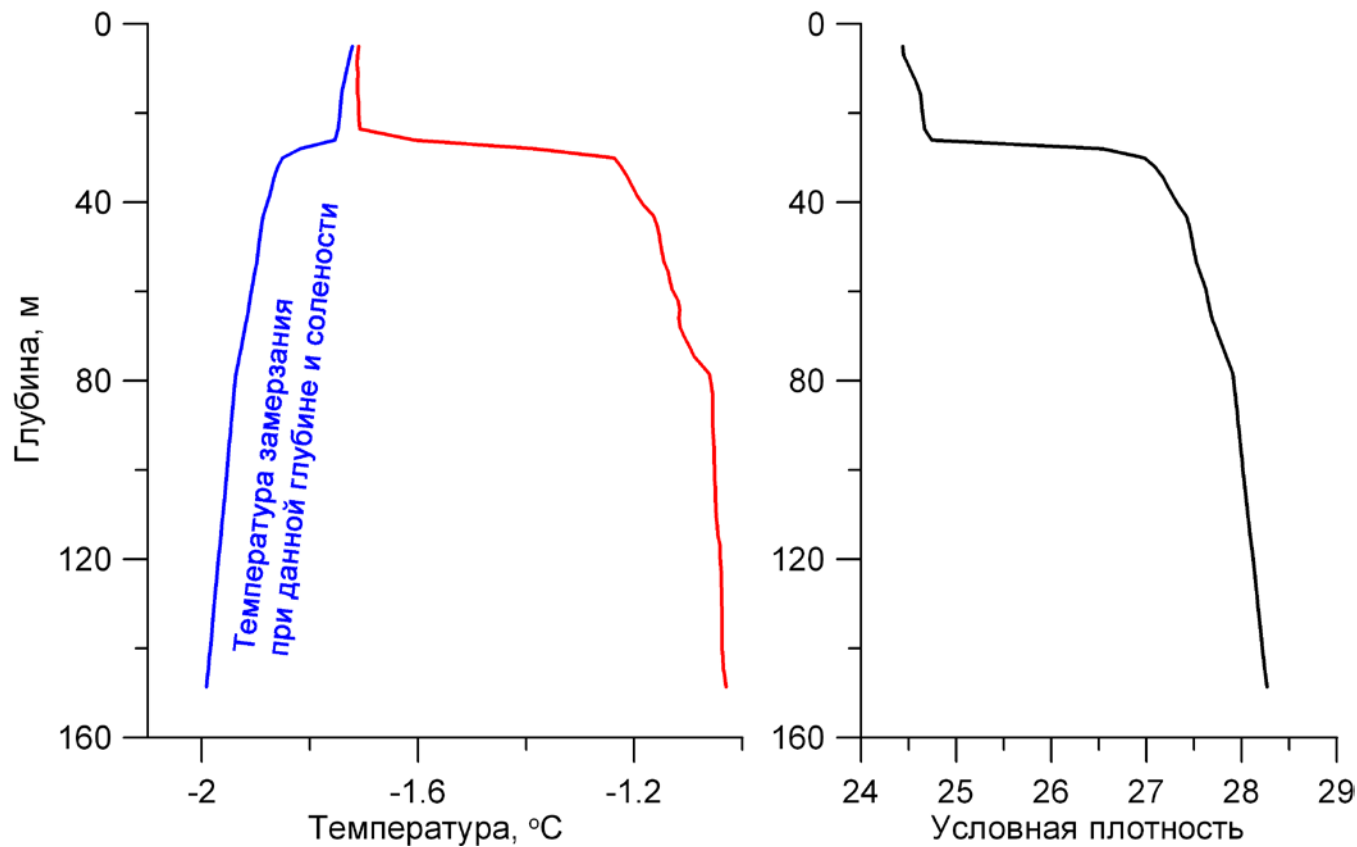


График
построен по
данным на
19 октября.

Конвекция не
пробивает
глубже 30 м.

В нижнем
слое высокая
соленость.

Внутренний прилив в Карских воротах Буйковая станция 1997 г.

Ширина пролива 45 км

Глубина седловины ~ 30-40 м

Поток воды из Баренцева моря **0.3-0.6 Sv.**

1 Sv = 10^6 м³/с

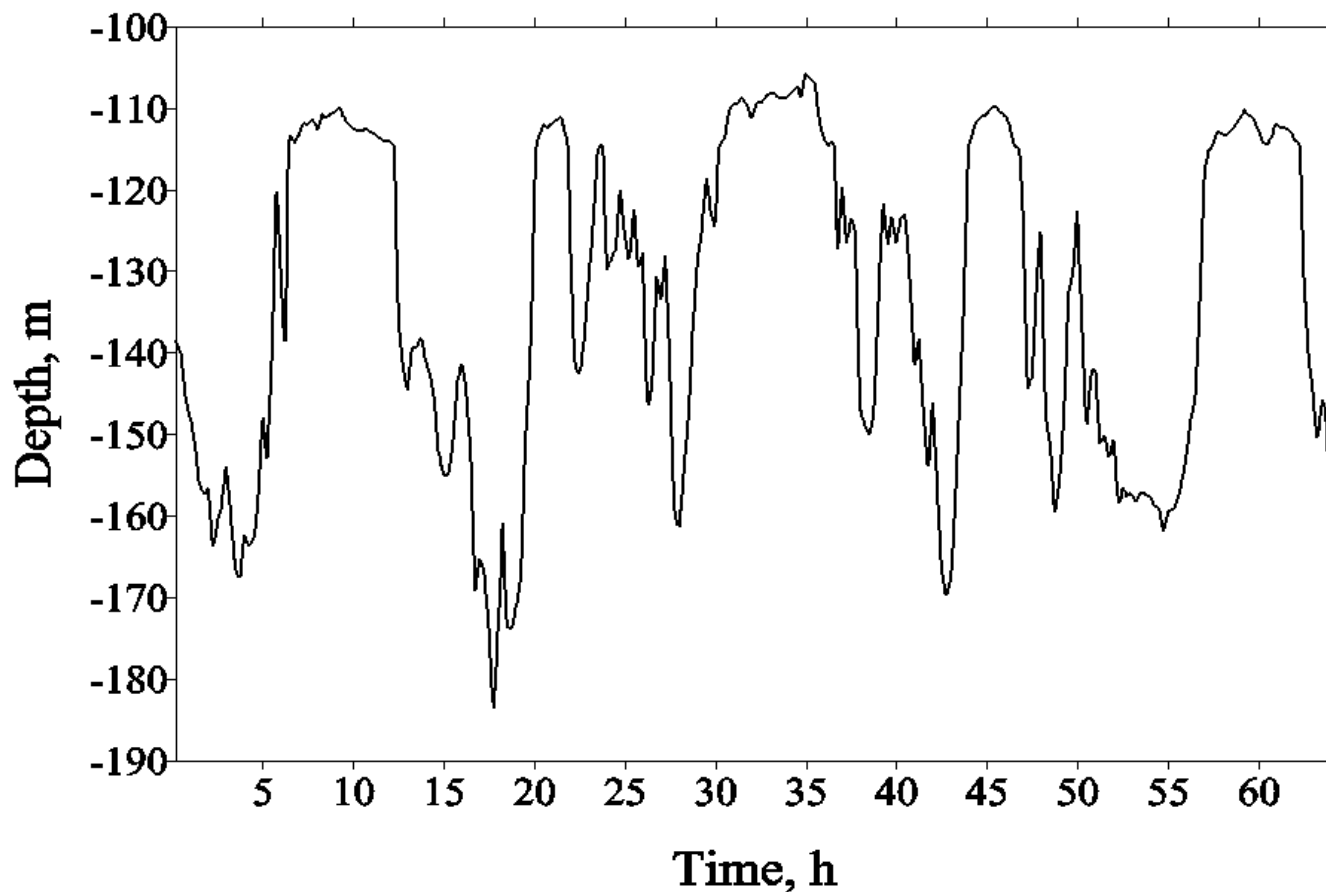
Скорости в ядре потока 15 см/с

Для сравнения:

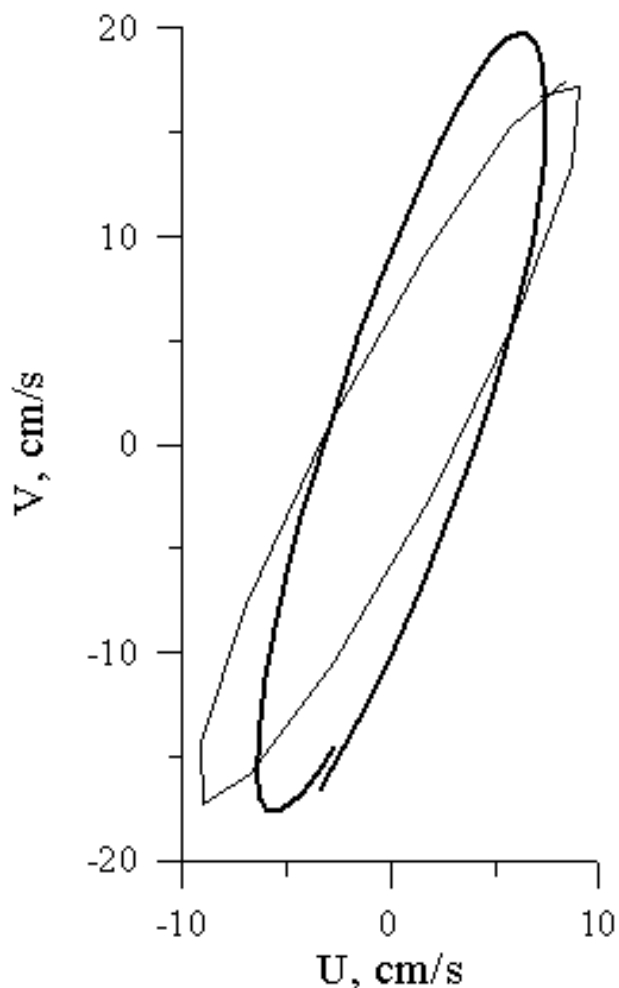
Совместный вынос Оби и Енисея **0.03 Sv**

Амазонка **0.2 Sv**

Колебания изотермы -0.4°C по данным измерений на буре



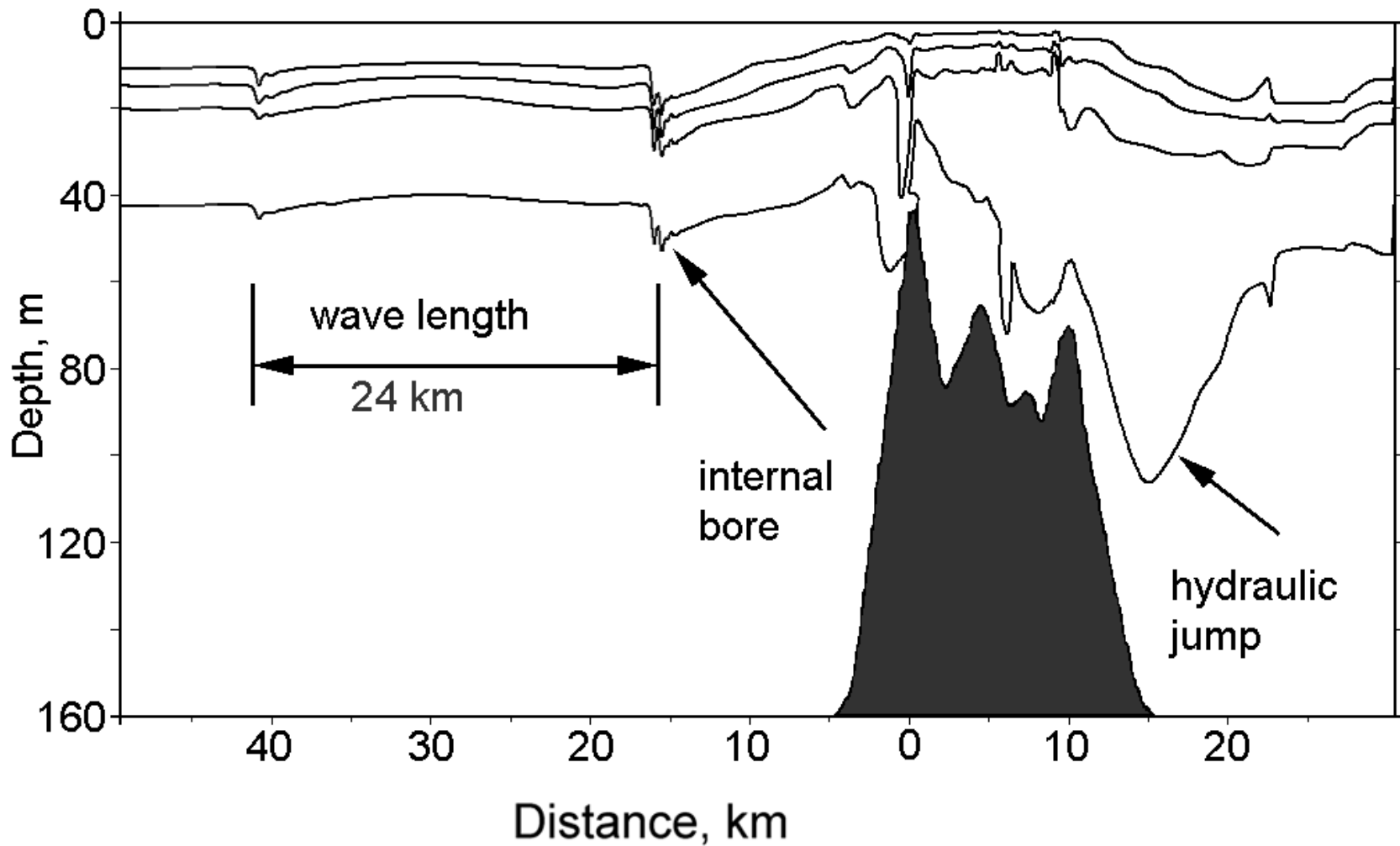
Баротропный прилив в Карских воротах



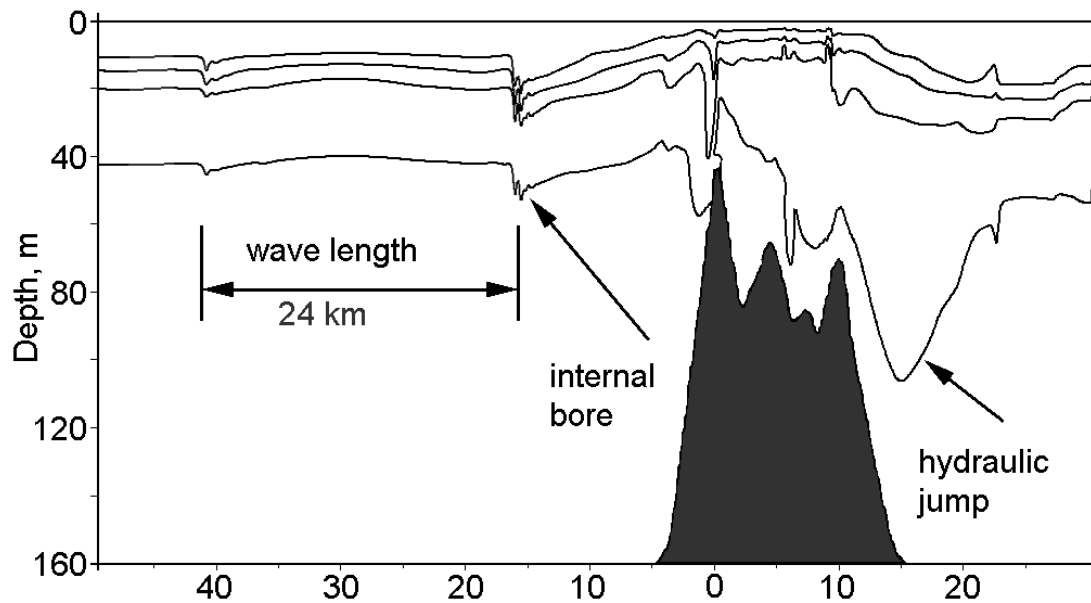
Толстая линия – эллипс приливных течений по измерениям на буйе в Карских воротах – толстая линия.

Эллипс приливных течений в этой же точке по альтиметрическим спутниковым данным TOPEX/POSEIDON – тонкая линия.

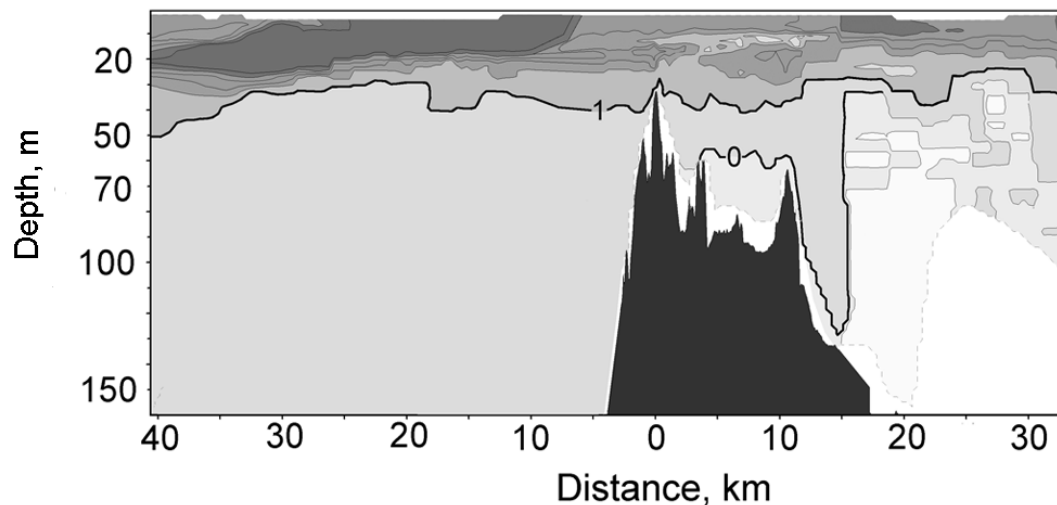
Расчеты по численной модели



Измерения сканирующим зондом в сентябре 2007 г



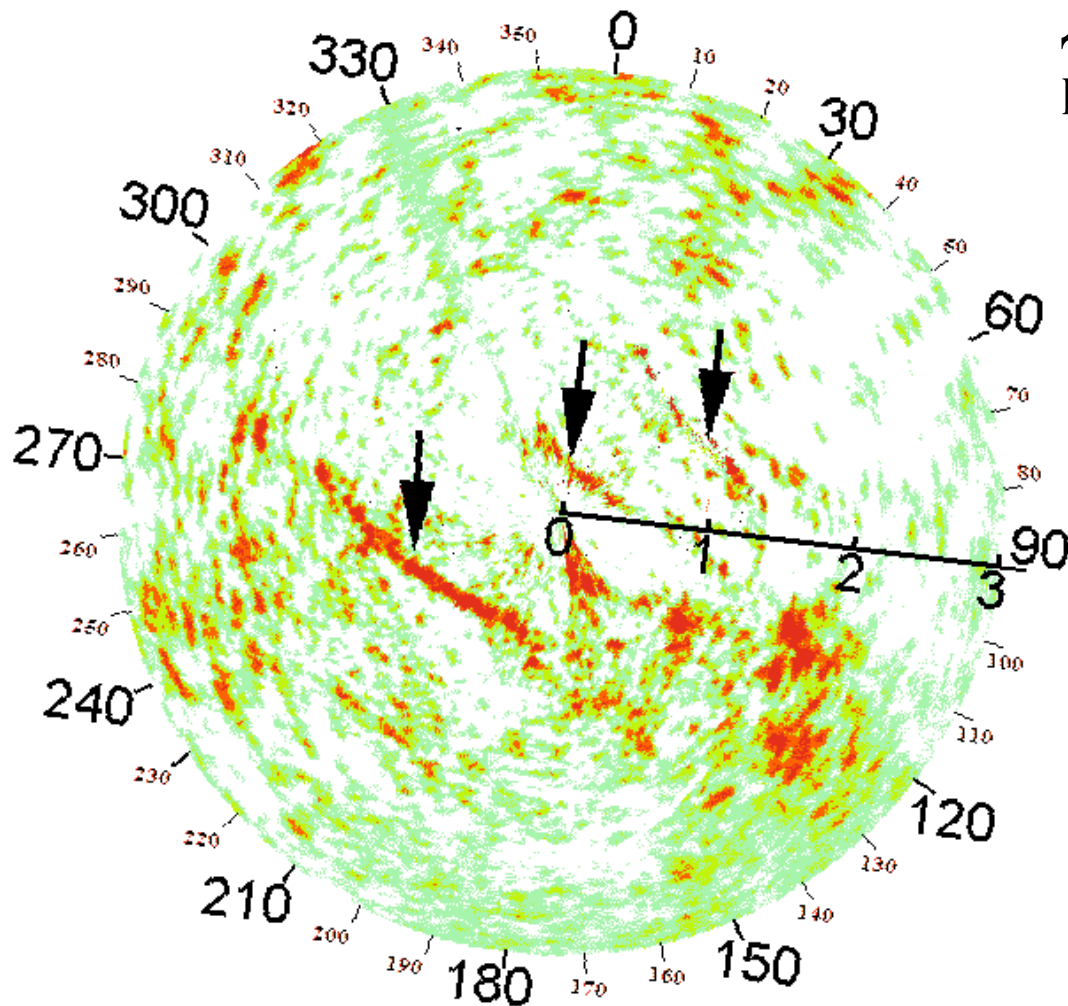
**Численная
модель**



Измерения

Радарное изображение поверхности моря

Длина волны излучения
радары 3.2 см



Радиус изображения -
три километра

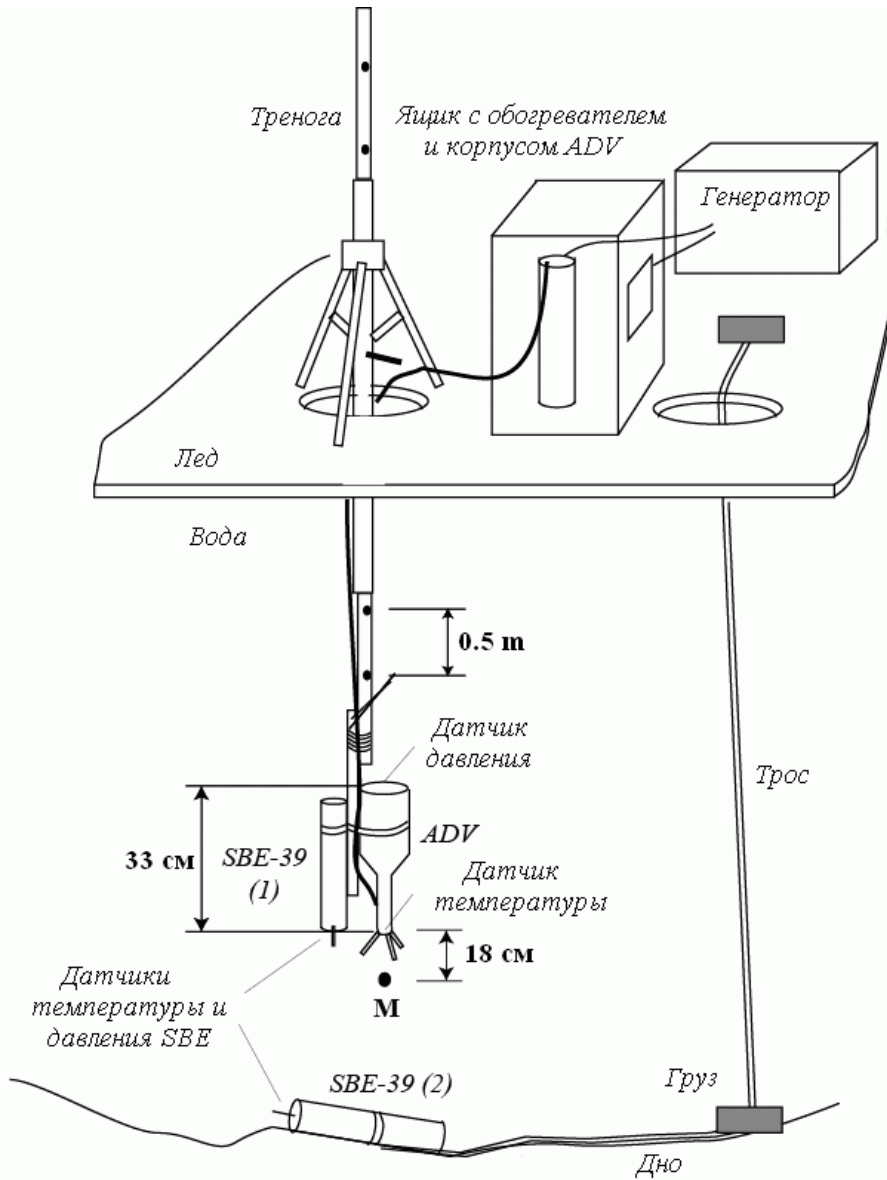
Внутренние волны подо льдом на Шпицбергене

Карта фиорда Ван Майен

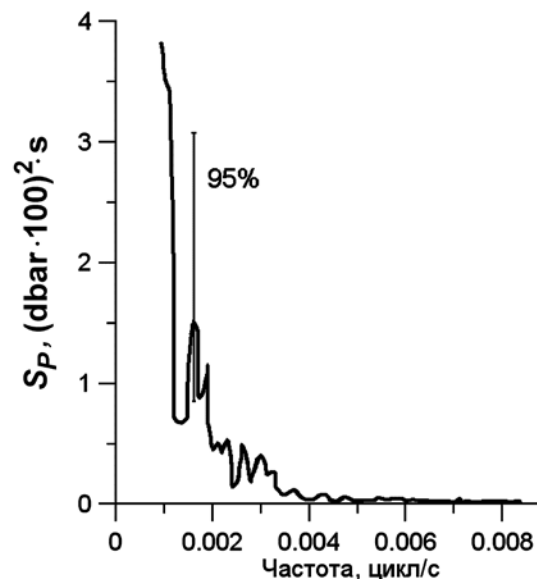
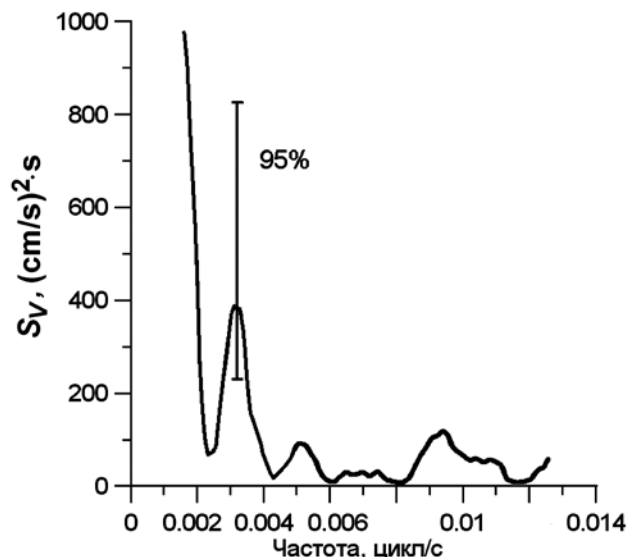
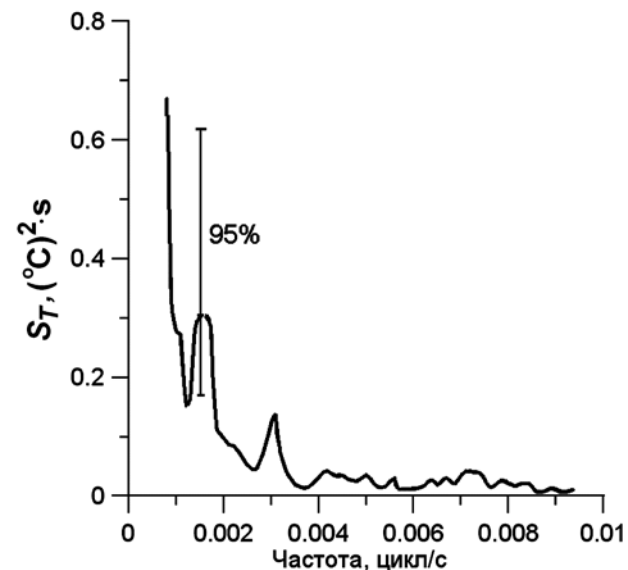


4° EAST GREENWICH 30° 15° 30° 16° 30° 17°

Измерения подо льдом



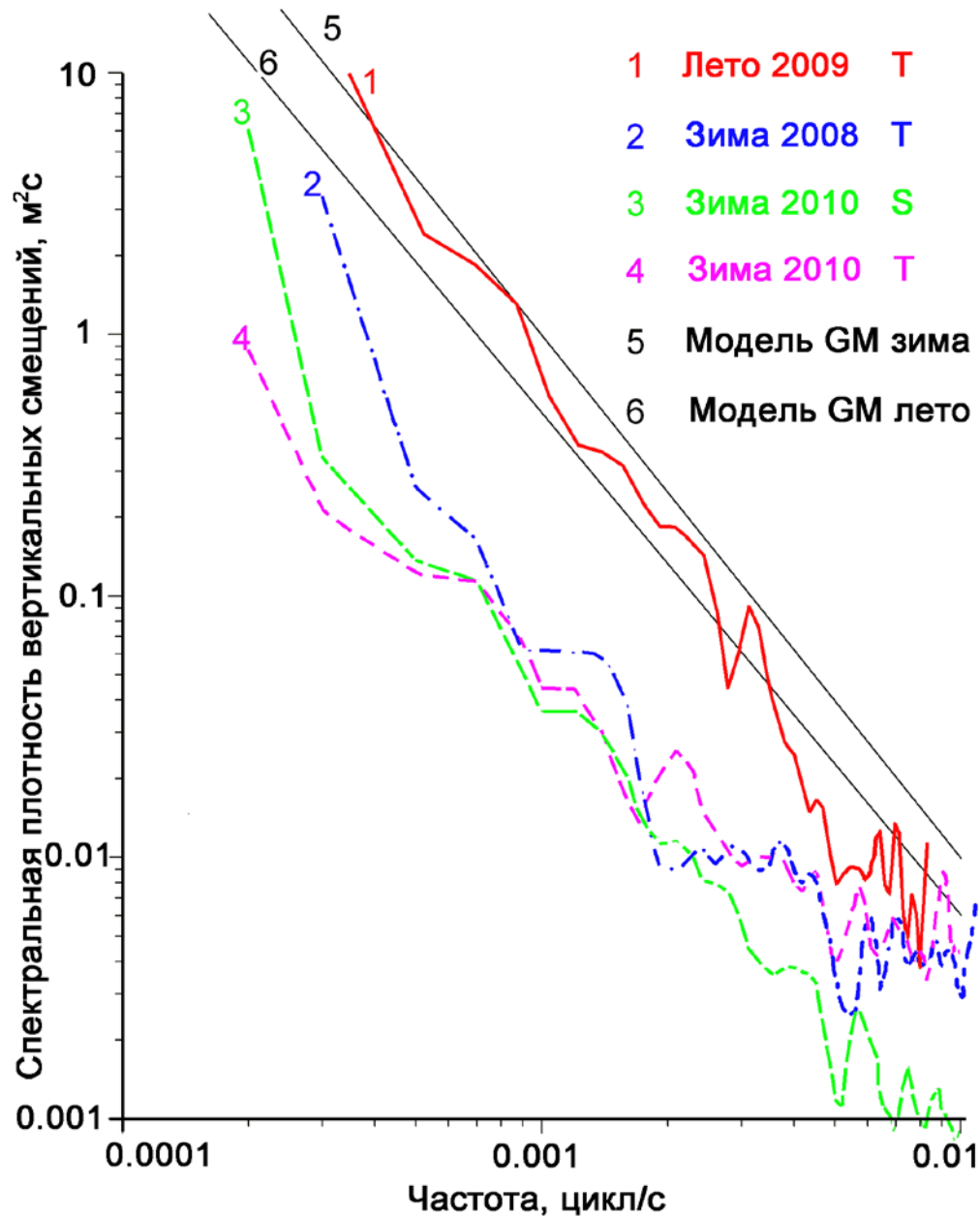
Спектры температуры, скорости подо льдом и давления на дне



Под ледовым покрытием зафиксированы короткопериодные внутренние волны (10 мин) с амплитудой около полуметра. Они создают колебания льда с амплитудой 6-7 мм. Длина волны 300-500 м.

Сравнение спектров вертикальных смещений зимой и летом

Статья Sigiyaма, Niwa, Hibiya,
GRL, 2009



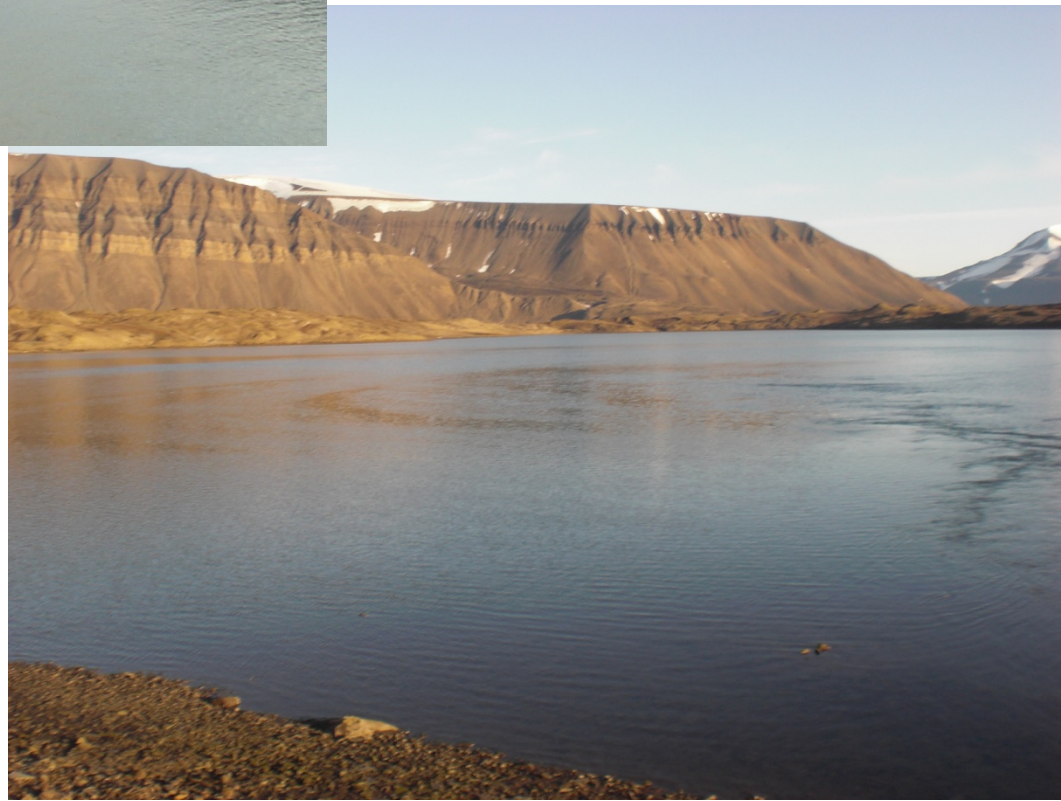
Генерация внутренней волны приливной струей



**Работы в
марте 2018 г.**



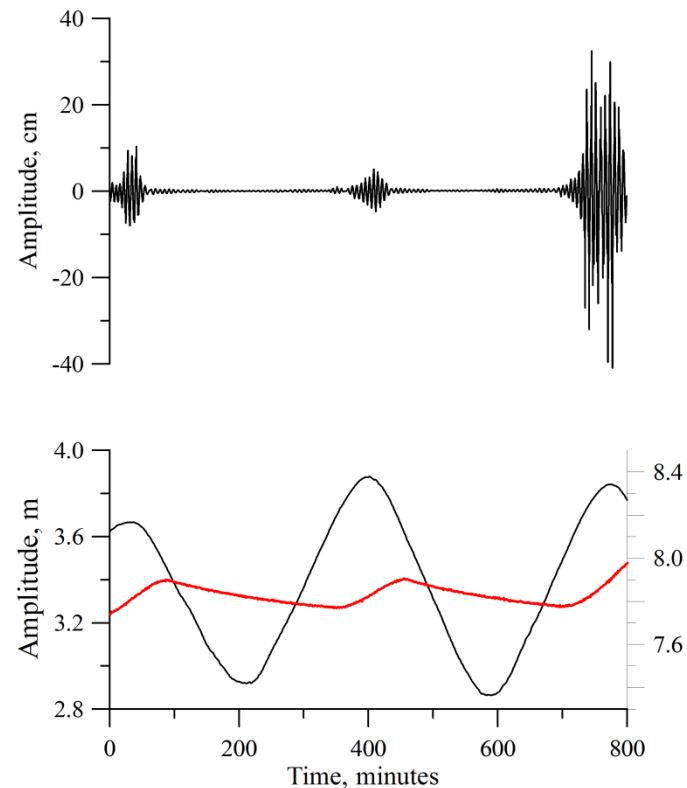
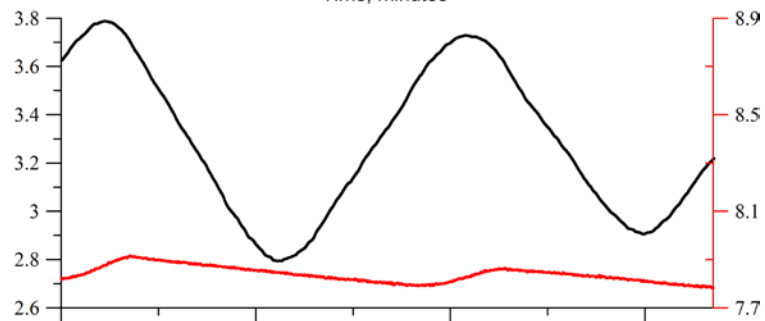
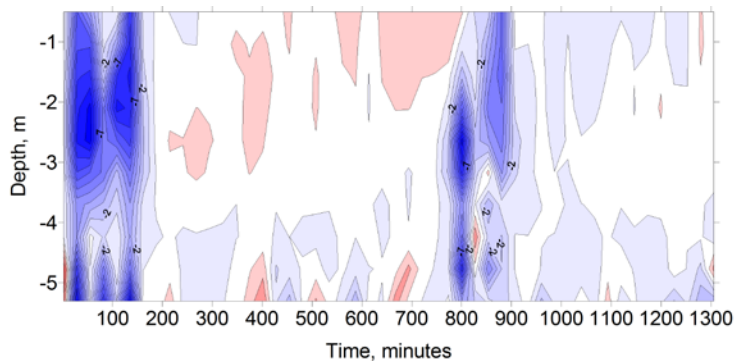
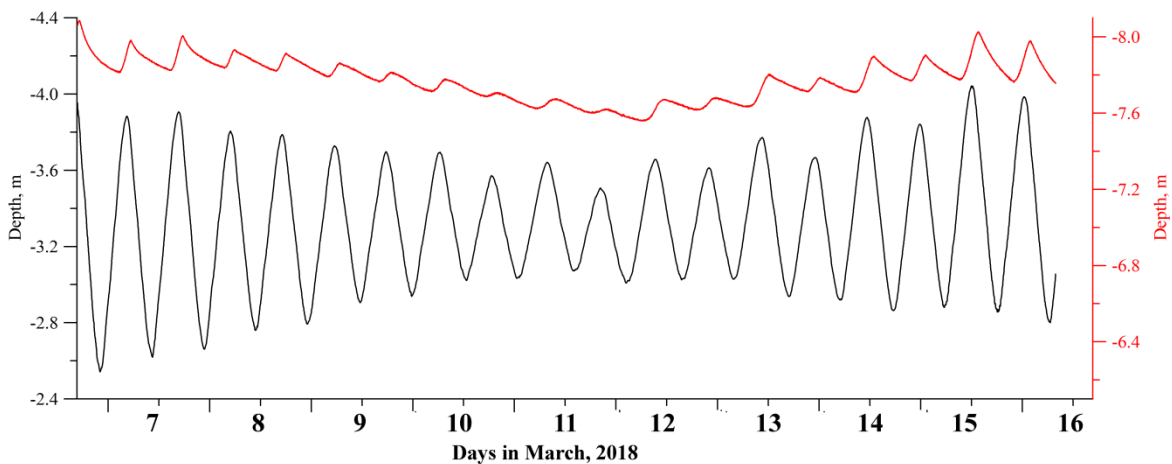
Струя вытекает в озеро Валунден



Постановка профилографа течений ADCP

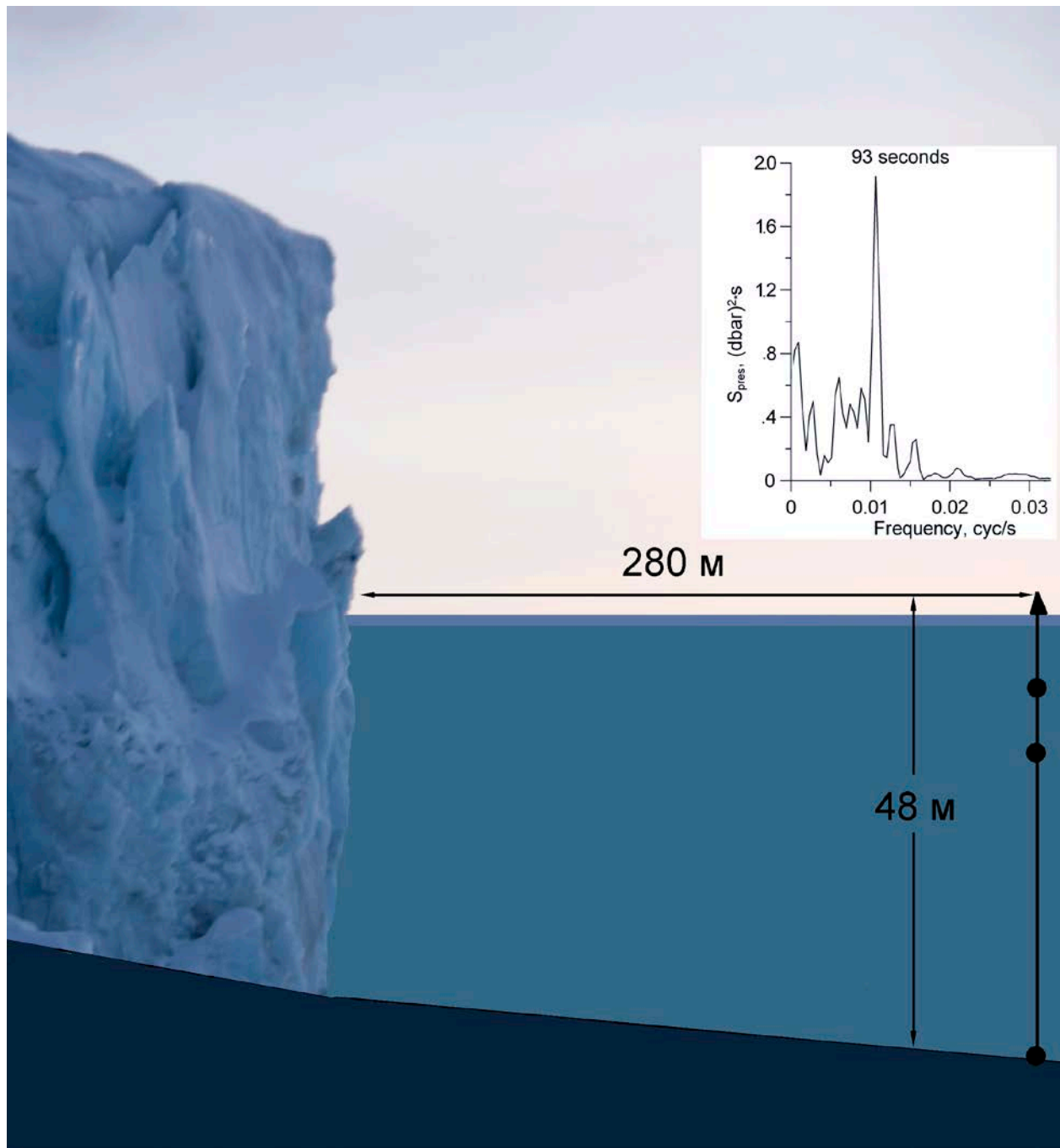


Прилив, вызывающий сильный поток в проливе





Генерация цунами подвижкой ледника

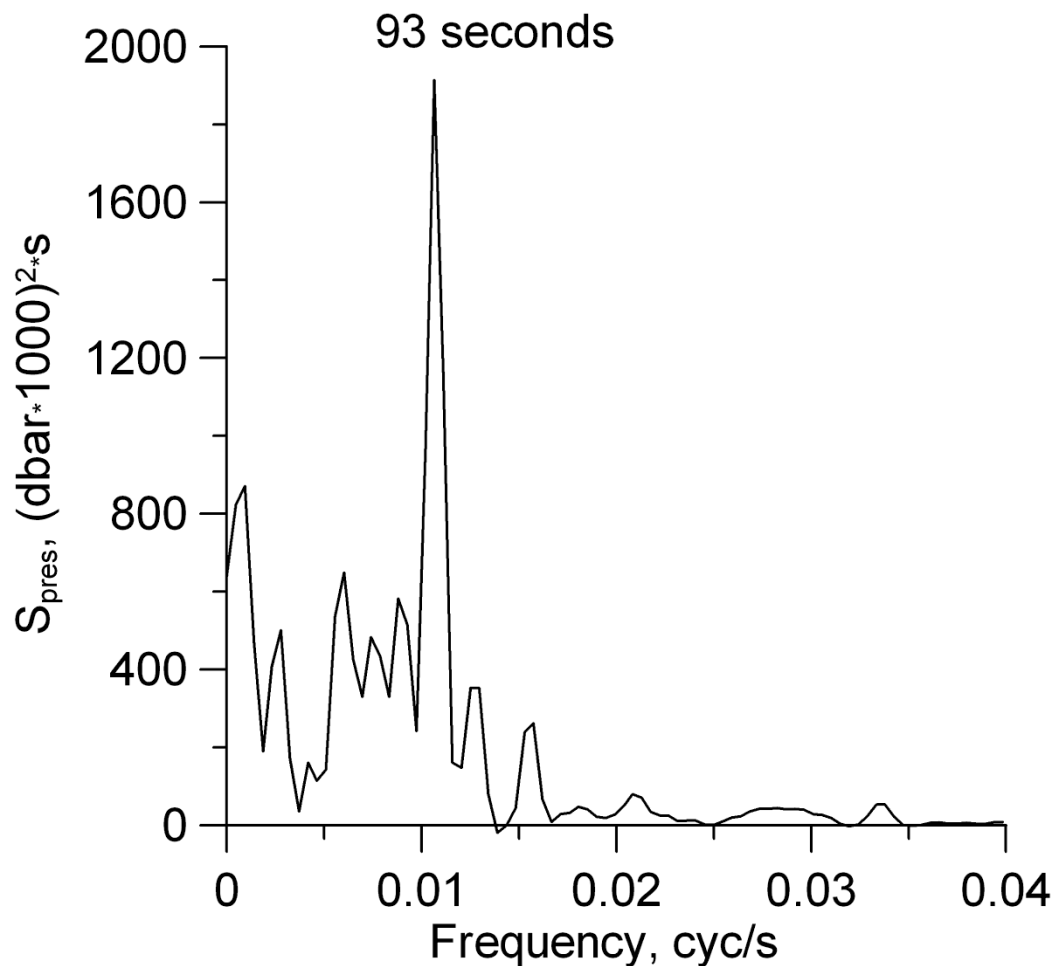


**Волна
цунами,
генерирована
подвижкой
ледника**

**Ледник
Тюна,
Темпл фиорд**

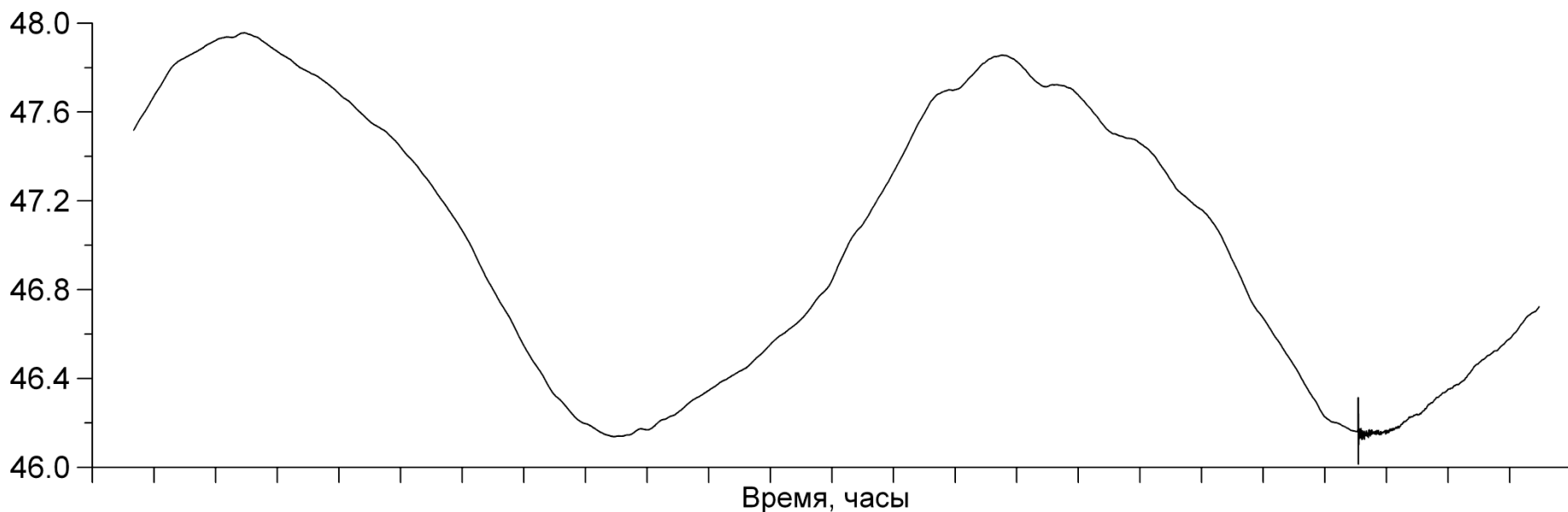
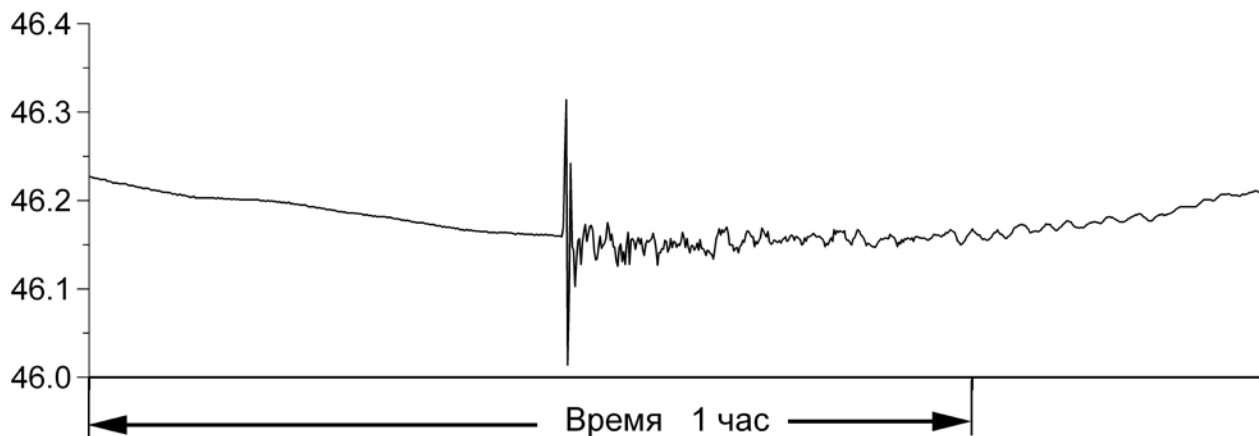


Спектр флуктуаций давления на дне (глубина моря около ледника 48 метров)



Запись волны цунами на фоне прилива.

Подвижка ледника произошла в фазу максимального отлива



Параметры волны цунами зарегистрированы донным мареографом

Период 93 с

Вертикальное смещение 30 см

Длина волны рассчитана 1850 м

Продолжительность колебаний около 1 часа

Такие цунами характерны для оползневых цунами

Кроме того, датчики давления, подвешенные на льду на глубине 9 и 16 м зарегистрировали дрожание ледяного покрова с периодом около 12 с



**Повреждения
ледового
покрова после
смещения
ледника**

**Повреждения ледового покрова после
того как большая глыба льда
откололась от ледника и упала на лед**



**Глыба льда
скоро упадет**





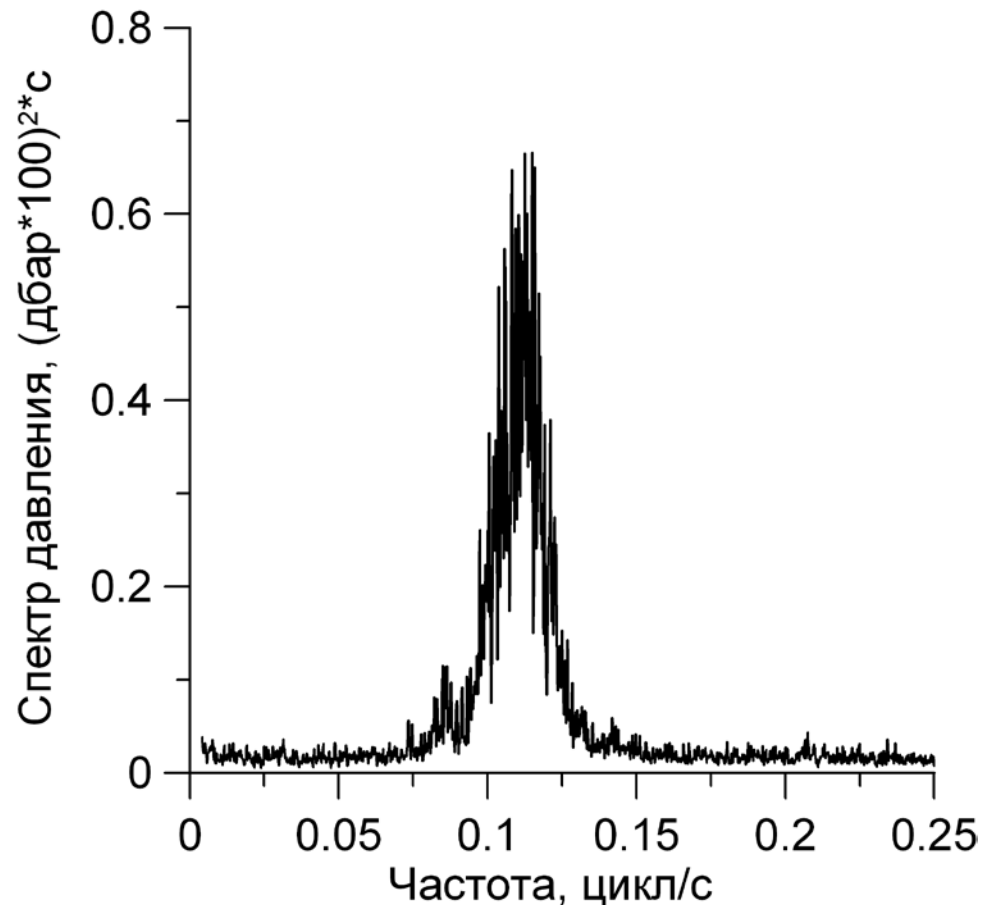
Шхуна Норденлихт

Зыбь, приникающая под лед. Измерения в 500 м от кромки льда

Период волн 9 с.

Амплитуда
смещения льда 5 см

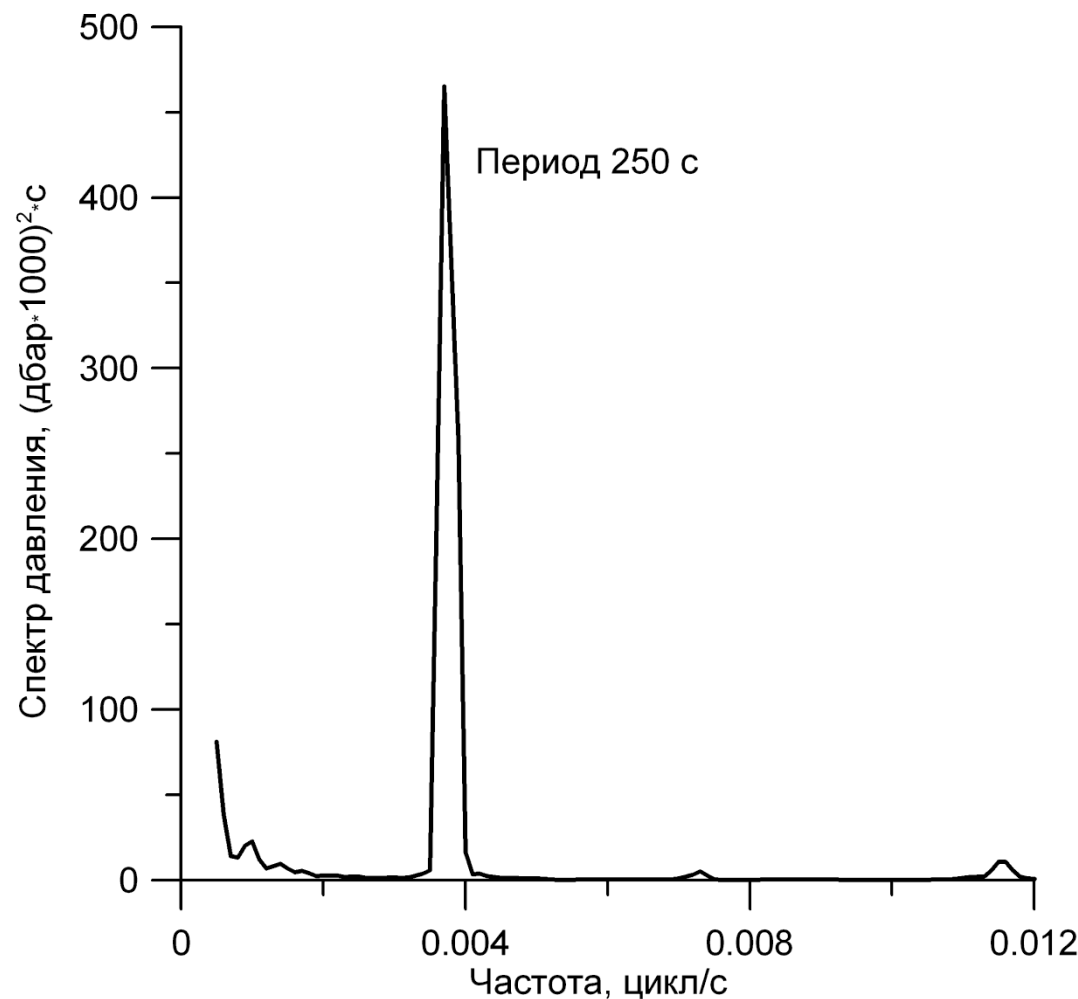
Длина волны 200 м



Сейшевые колебания в круглом замерзшем озере диаметром 1 км

Период сейши 250 с

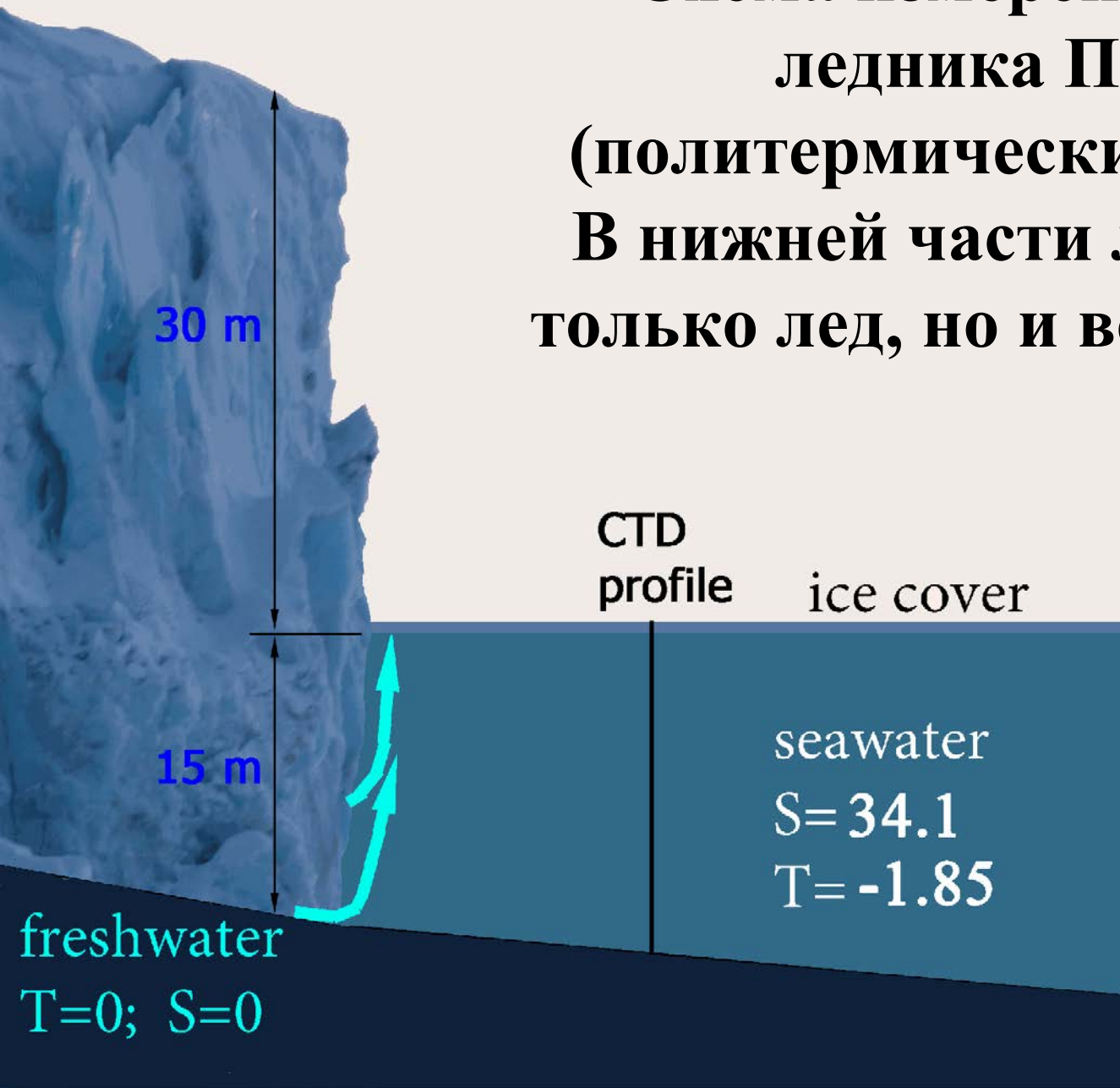
Амплитуда
смещения льда 7-8 мм



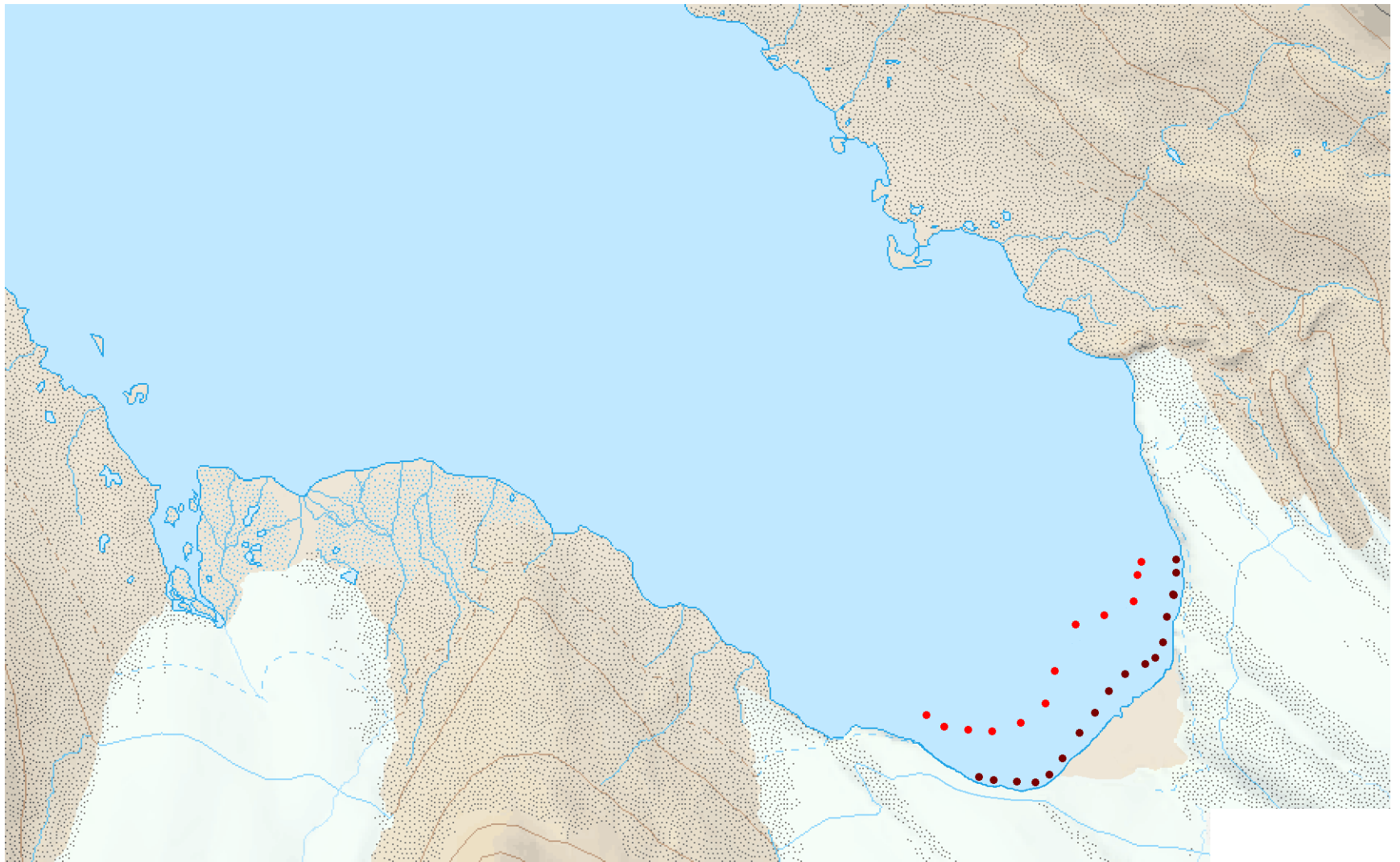
Переохлажденная вода около ледника



**Схема измерений около
ледника Паула
(политермический ледник).
В нижней части ледника не
только лед, но и вода до 0.1%.**



Карта ледника и точки промера глубин в 2013 г. (красные точки) и 2015 г. (бордовые)



Промер глубин около ледника

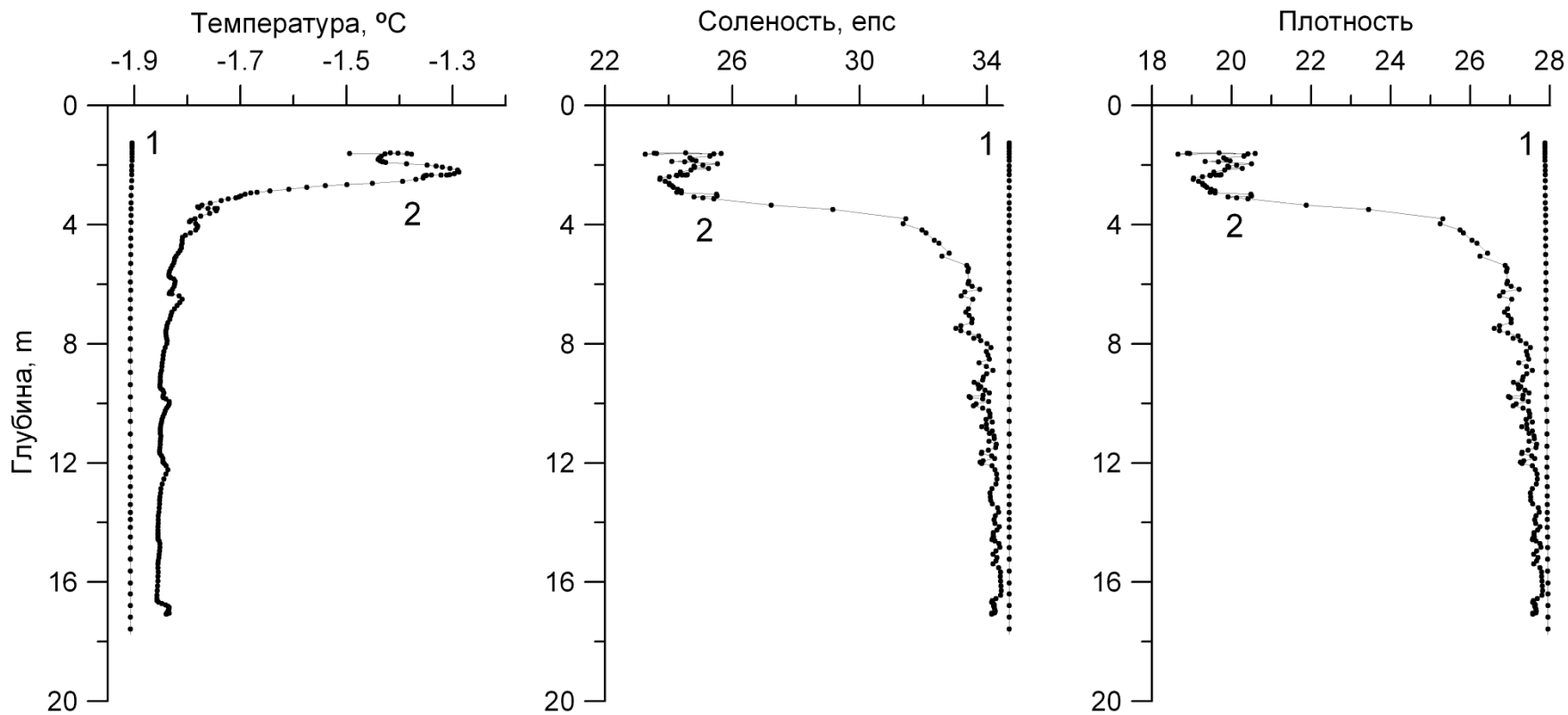


**Просверлили политермический ледник вглубь на 10 метров.
Снаружи температура -12°C , внутри -4°C .
Видимо дальше еще теплее.**

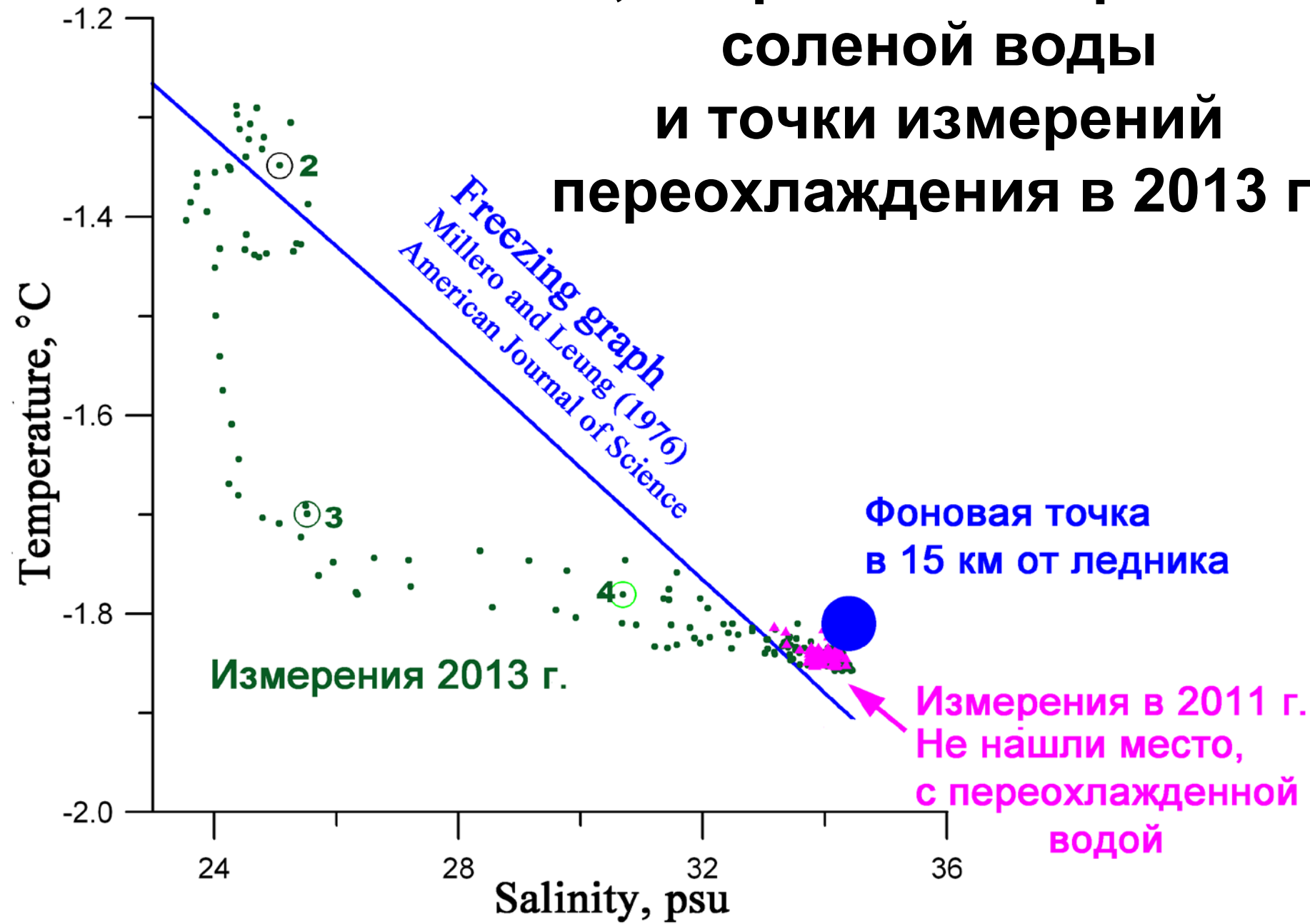


Вертикальные распределения температуры солености и плотности

1. 15 км от ледника: все перемешано
2. 15 м от ледника: меньшие солености и вода теплее



T,S –кривая замерзания соленой воды и точки измерений переохлаждения в 2013 г.



**Доклад окончен.
Исследования Арктики продолжаются !**



