



География Мирового океана

Курс лекций для кафедры физики моря и вод суши (Физический факультет МГУ)

Лекция 6

Суточный ход температуры воды. Коэффициент вертикального турбулентного перемешивания. Внутренние волны в морях и океанах

Мысленков Станислав Александрович

МГУ имени М.В.Ломоносова, Географический факультет,

кафедра океанологии

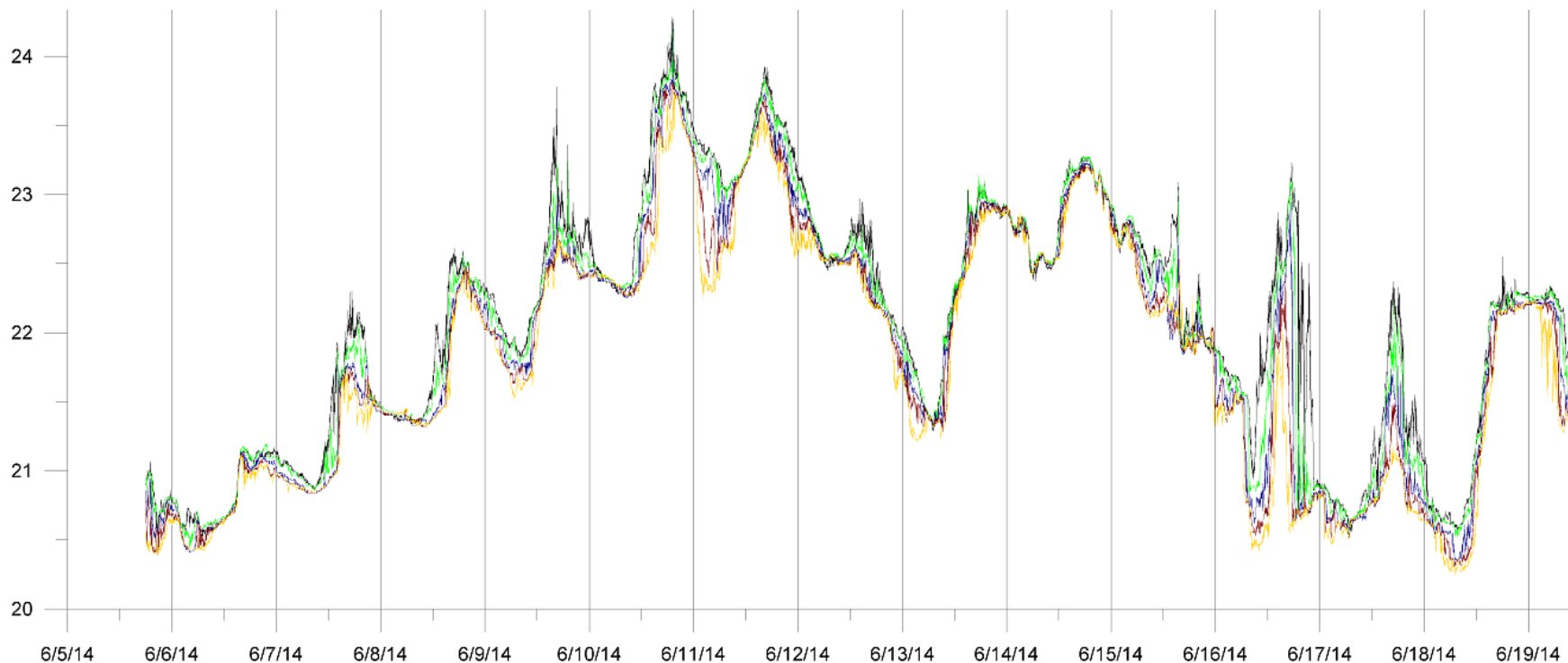
stasocean@gmail.com

Суточный ход температуры воды

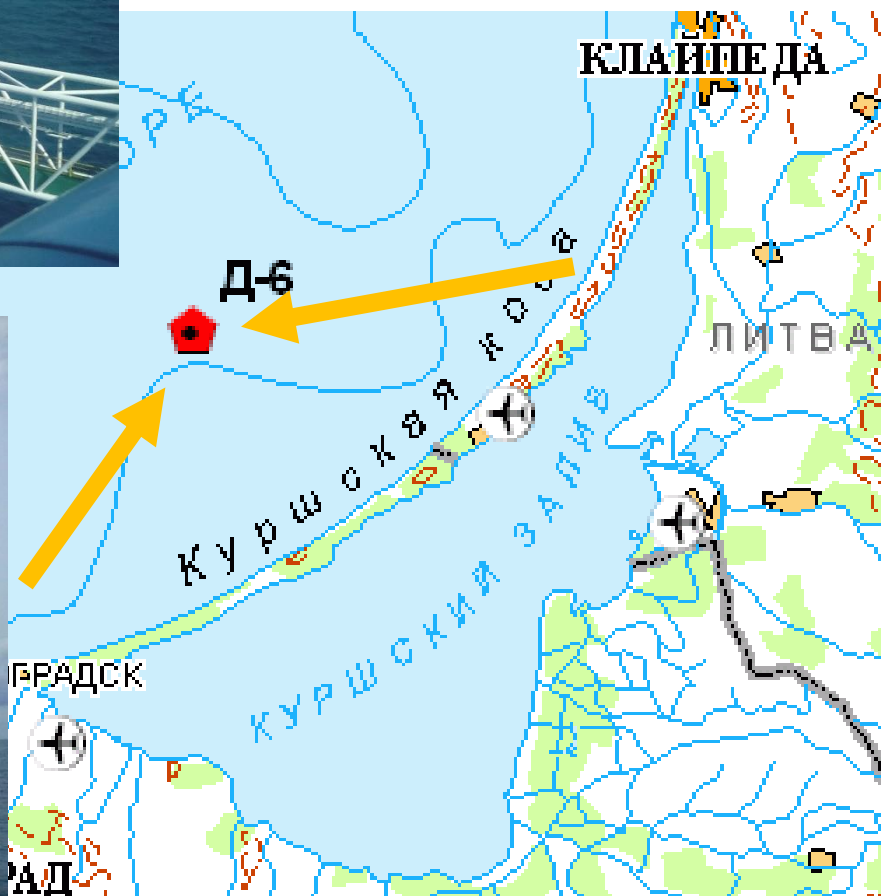
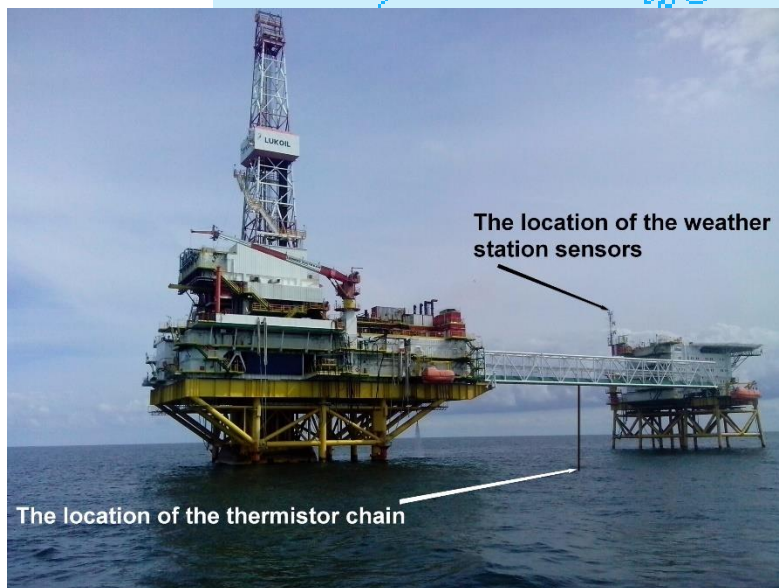
Суточный ход – колебания температуры воды, обусловленные изменением теплового баланса и с теплом, переносимым течениями и вертикальным обменом вод

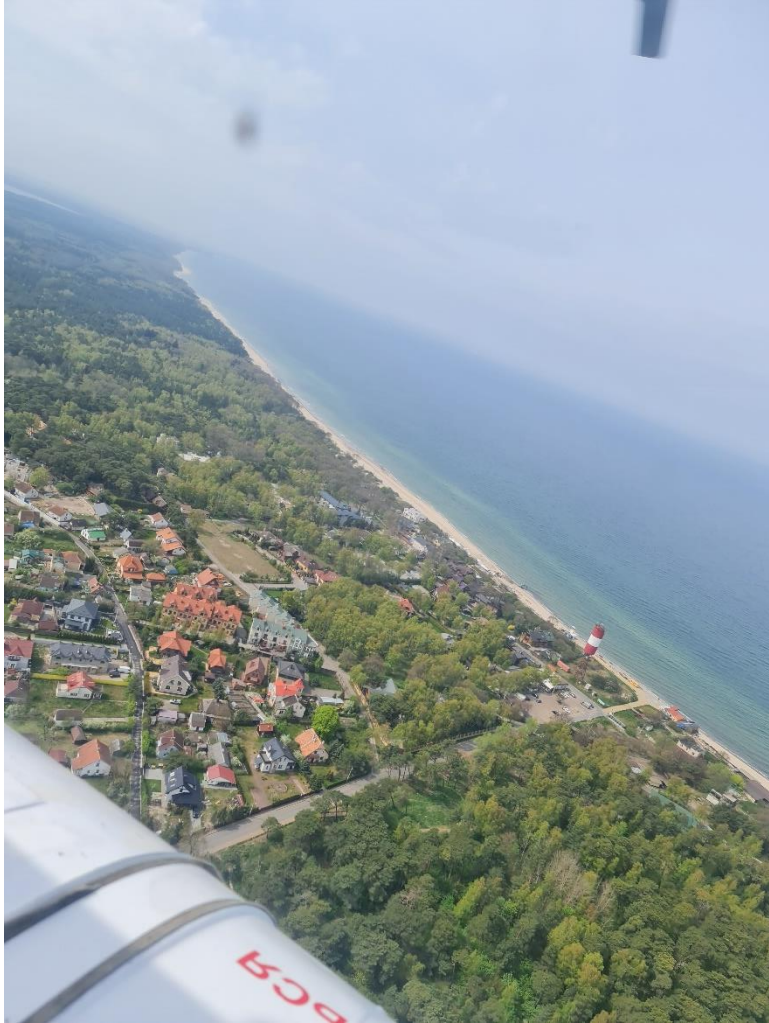
Суточный ход температуры зависит от коротковолновой и длинноволновой компонент теплового баланса

Пример изменения температуры воды в Геленджике

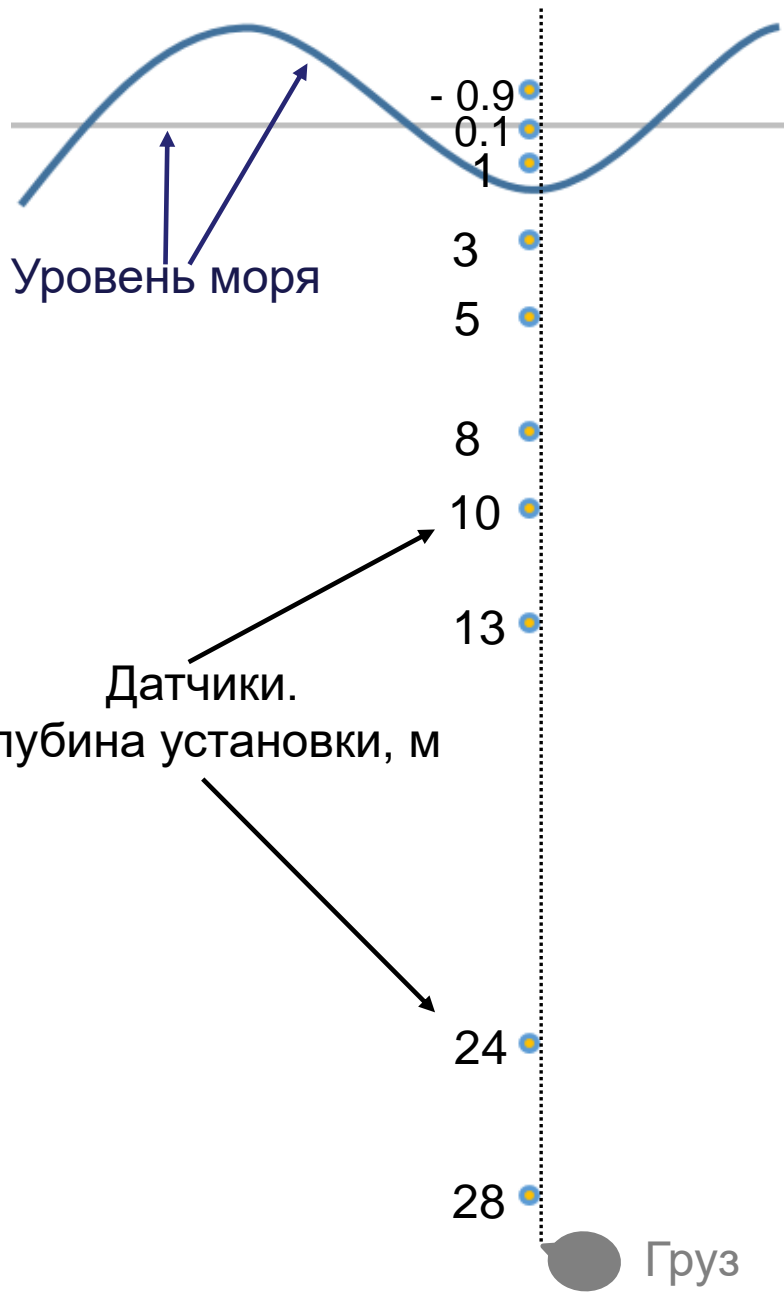


В августе 2015 года на платформе Д6 была установлена термокоса с датчиками Star Oddi (10 шт)





Расположение датчиков на термокесе



Дискретность по времени 1 мин.

Точность ± 0.025 °C

Ресурс памяти 480 суток.

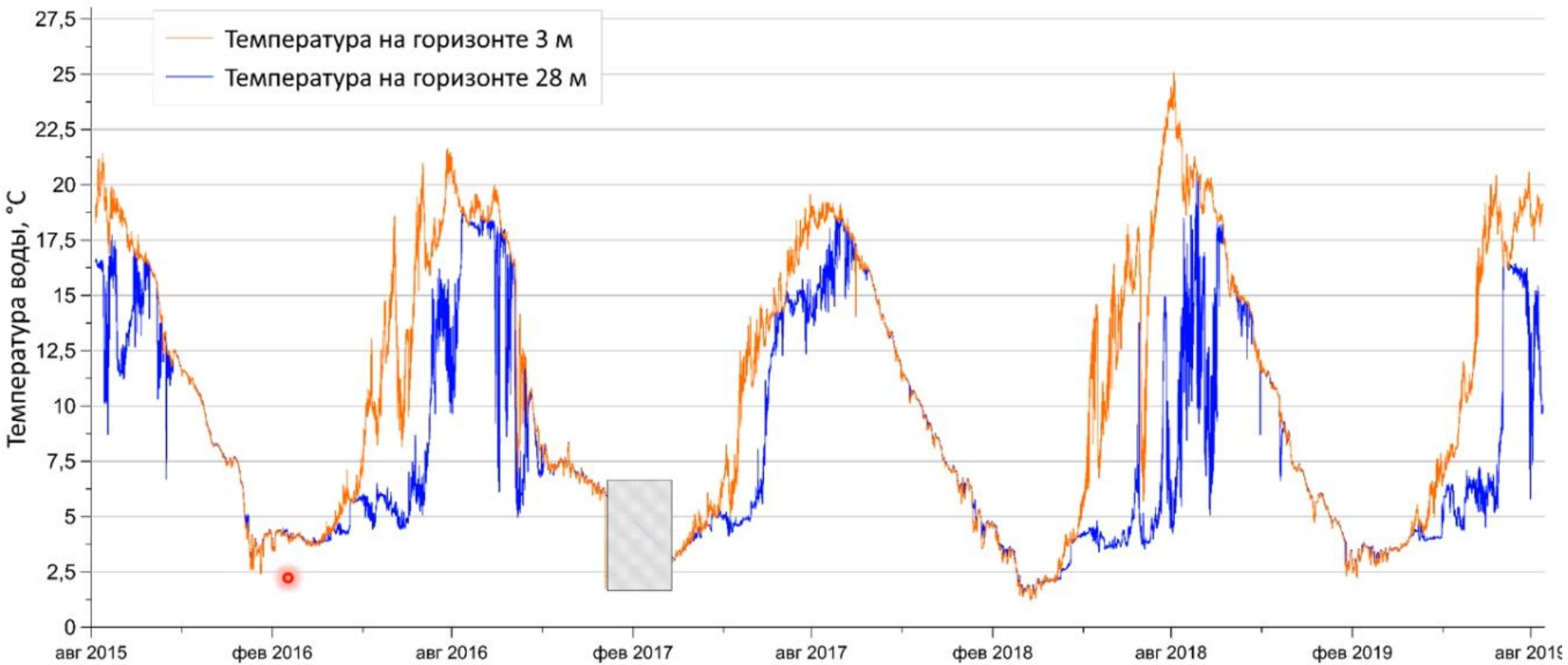
Данные получены для периода с
5.08.2015 по **13.08.2019**.

Всего было получено данных за 1470
суток, это около 2 млн записей для
каждого горизонта.

Более подробно технические
характеристики приведены на сайте
http://infomarcompany.com/Starmon_rus.pdf

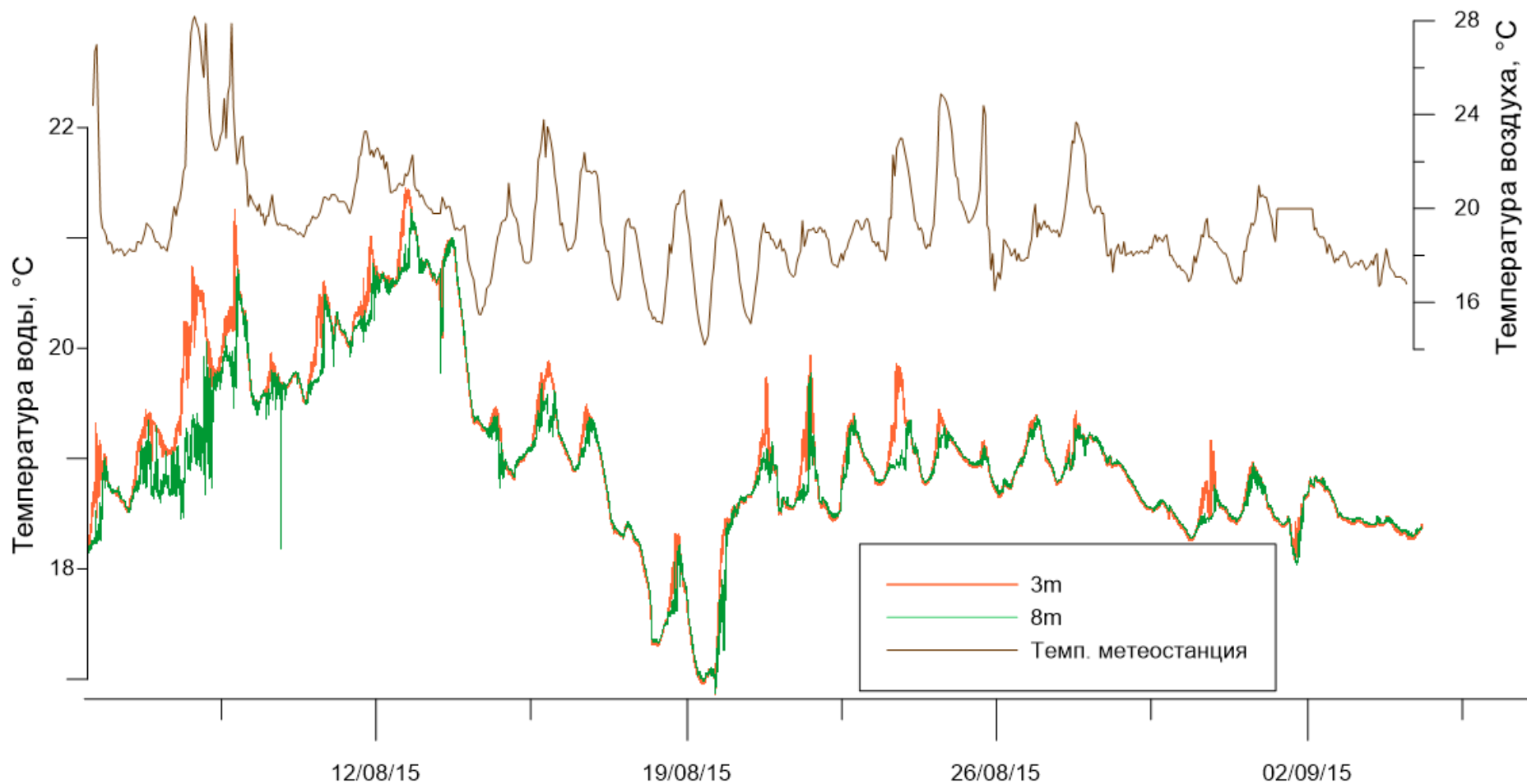


Межгодовая изменчивость



Максимум за весь период наблюдений **25,12 °C** в августе 2018
Минимум **1,2 °C** в марте 2018.

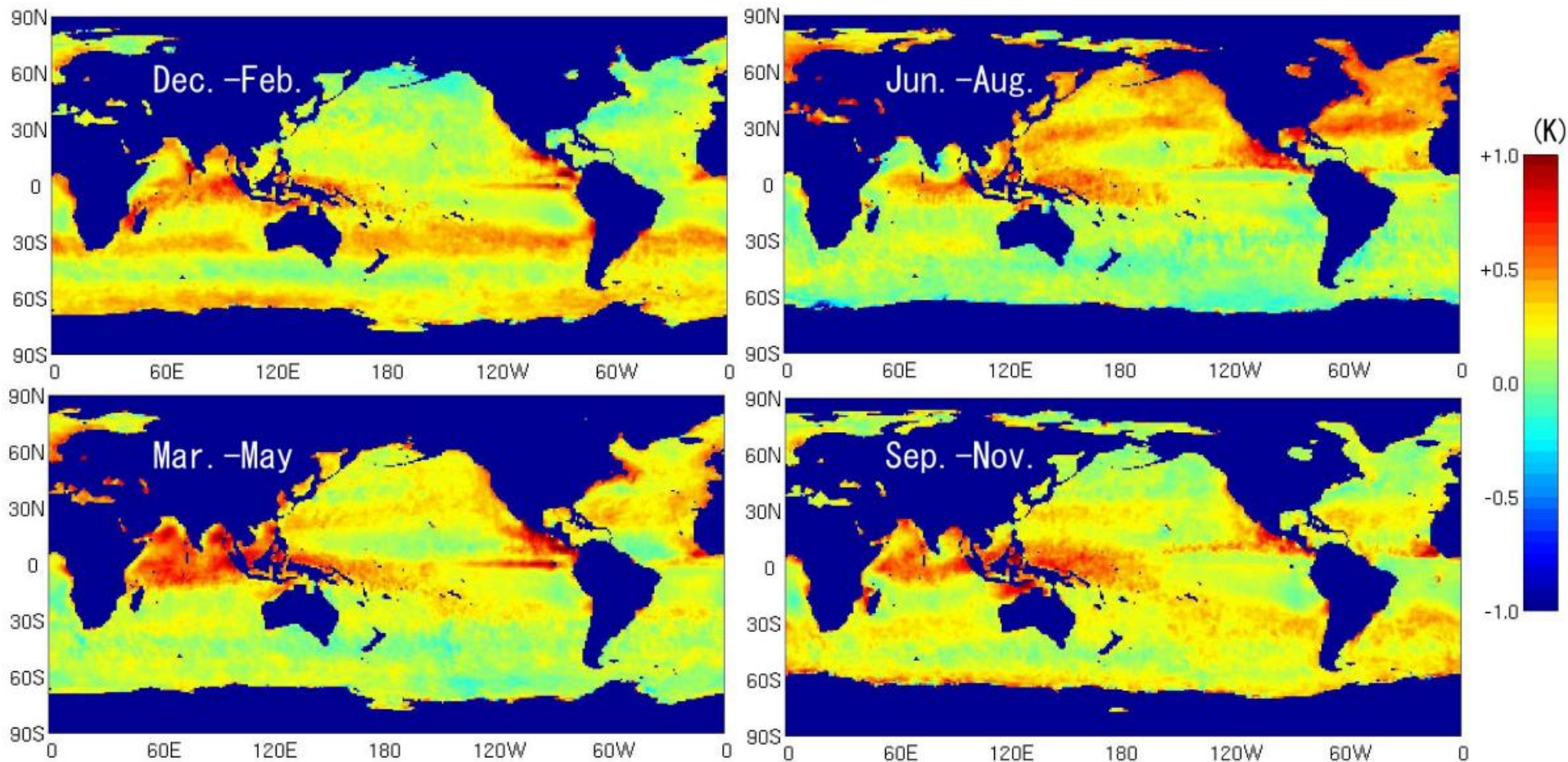
Анализ суточного хода температуры воды и воздуха



Суточный ход температуры воды на горизонтах 1, 3, 5, 8 м хорошо выделяется в период с 5.08 по 2.09 и с 18.03 по 25.05.

Амплитуда суточного хода температуры воздуха составляет в среднем 4-5 °С, для воды 0.5-1 °С. Амплитуда суточного хода на глубине 5 м меньше чем на глубине 3 м приблизительно на 0.2-0.3°С. На глубинах 10 и 13 м суточный ход прослеживается слабо, а глубже отсутствует.

Амплитуда (разность дневных и ночных) суточного хода температуры воды в Мировом океане



Типы турбулентного перемешивания

Для Мирового океана характерны два основных типа перемешивания - *молекулярное и турбулентное*.

Молекулярное перемешивание происходит в результате теплового взаимодействия между отдельными молекулами и носит микроскопический характер броуновского движения. Турбулентное перемешивание осуществляется за счет перемещения больших объемов воды. Молекулярное перемешивание ассоциируется с *ламинарным (слоистым) движением*, турбулентное - с *турбулентным движением жидкости*, которое может быть горизонтальным и вертикальным. Упорядоченный ламинарный характер движения быстро переходит в неупорядоченный, хаотический, турбулентный характер движения. И хотя границы этого перехода весьма расплывчаты, турбулентность является процессом доминирующим; перемешивание в океане (как и в атмосфере) является существенно турбулентным, поэтому о перемешивании в океане говорят как о *морской турбулентности*. Однако, процесс молекулярного перемешивания не уничтожается турбулентностью, а продолжает существовать как бы внутри нее.

Морскую турбулентность, в свою очередь, можно разделить на два основных класса:

1. *Динамическую турбулентность* (по А.Дефанту), или *адвективное (фрикционное) перемешивание* (по Н.Н.Зубову). Динамическая турбулентность возникает вследствие наличия в жидкости градиентов скорости и вызванной ею передачи количества движения и других свойств жидкости из одной области в другую.
2. *Гравитационную турбулентность* (по А.Дефанту), или *конвективное перемешивание* (по Н.Н.Зубову). Возникает вследствие появления в жидкости отрицательных градиентов плотности и, следовательно, гравитационной

неустойчивости, вызывающих образование вертикальных конвекционных потоков, перемешивающих жидкость до степени однородности.

Динамическая турбулентность может существовать как в однородной, так и в неоднородной, или стратифицированной жидкости; гравитационная турбулентность *может существовать лишь в неоднородной жидкости* - при нарушении устойчивой стратификации. Динамическая турбулентность представляет преобладающее, *стационарное явление*, гравитационная – временное, *нестационарное* явление, возникающее вследствие суточного и сезонного изменения плотности воды.

Конвективное перемешивание может быть разделено на два класса - *термохалинную конвекцию и целлюлярную (ячеистую) конвекцию*.

Термохалинная конвекция возникает из-за понижения температуры или повышения солености, или же из-за совместного действия этих факторов, вызывающих появление плотностной неустойчивости, и, как следствие, появление вертикальных конвективных токов. В зависимости от причин, *вызывающих конвекцию*, она может быть разделена *на три типа*: термохалинная конвекция, возникающая в результате *осолонения при льдообразовании, понижения температуры и осолонения при испарении*.

Типы турбулентного перемешивания

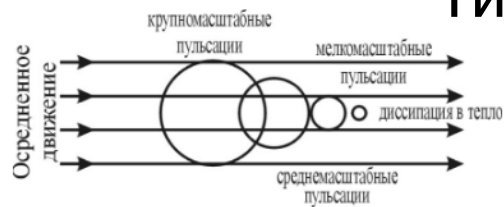


Рис.7. Передача энергии осредненного движения через пульсации различного масштаба

Вследствие непрерывного прохождения вихрей различных размеров скорость турбулентного течения в каждой точке со временем пульсирует около среднего значения (рис.8). При неоднородном поле скорости, температуры, солёности и других характеристик их значения также беспорядочно пульсируют. По предложению Рейнольдса (1895) значения этих характеристик в точке в данный момент - *мгновенные значения* – можно представить в виде суммы среднего значения и пульсационного отклонения от него:

$$u=U+u', v=V+v', w=W+w', t=T+t', s=S+s',$$

где U, V, W, T, S – составляющие осредненной скорости, температуры и солёности,

u', v', w', t', s' – пульсационные составляющие или пульсации этих же параметров.

Количественная оценка турбулентного переноса различных свойств жидкости была впервые дана Дж. Тэйлором (1915) и В.Шмидтом (1911, 1925). Выводы Тэйлора и Шмидта были дополнены А.В.Келлером (1930), который подчеркнул статистический характер процесса обмена и вывел формулу турбулентного обмена субстанцией через единицу площади в единицу времени

$$Q = -K \frac{dq}{dz},$$

где коэффициент K называют коэффициентом турбулентного обмена субстанцией.

Под субстанцией понимается некоторая количественная характеристика жидкости, пропорциональная массе или количеству частиц в объеме. Примерами субстанции являются количество движения, количество тепла, количество солей.

Если рассматривать турбулентный поток количества движения, турбулентный поток тепла и турбулентный поток солей, то на основании предыдущей формулы можно записать:

$$Q_M = -K_M \frac{dU}{dz}; Q_T = -K_T \frac{dT}{dz}; Q_S = -K_S \frac{dS}{dz},$$

где U – осредненная скорость, T – температура, S – солёность, K_M, K_T и K_S – коэффициенты турбулентного обмена количеством движения, турбулентной теплопроводности и турбулентной диффузии.

Расчет коэффициента турбулентного перемешивания

Уравнение теплопроводности Фурье (Мамаев, 2000): $\frac{\partial T}{\partial t} = K_T \Delta T$

$K_T = K/C \cdot \rho$ - коэффициент турбулентной температуропроводности [$\text{м}^2/\text{с}$]

K - коэффициент турбулентной теплопроводности

C – удельная теплоемкость

ρ - плотность

Согласно первому закону Фурье,

амплитуда колебаний убывает с глубиной по экспоненциальному закону (Мамаев, 2000)

$$A_z = A_0 e^{-\sqrt{\frac{\pi}{K\tau}}z}$$

A_z, A_0 – амплитуда колебаний на разных горизонтах

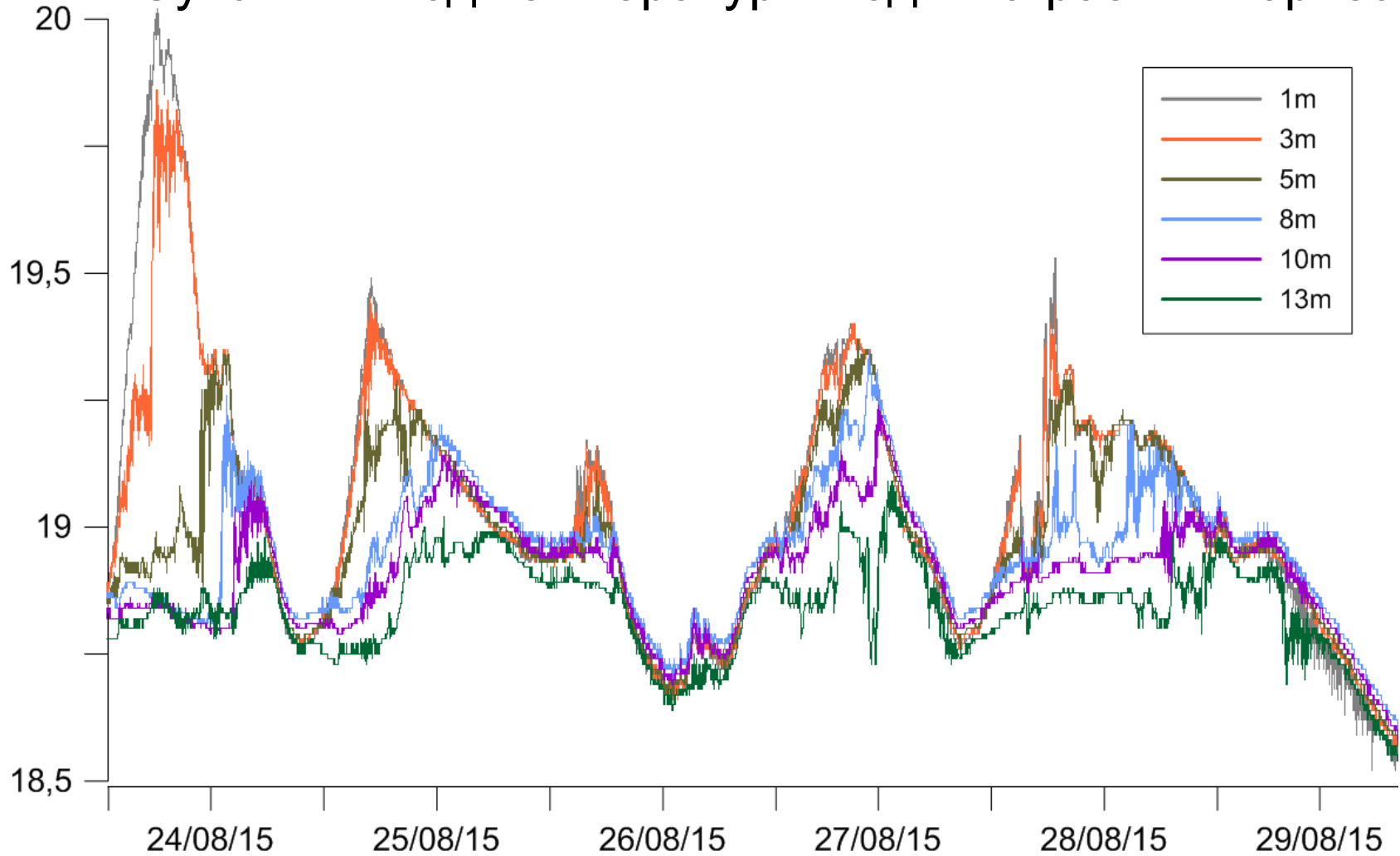
τ – период колебаний

K - коэффициент турбулентной температуропроводности

Зная амплитуду колебаний на разных горизонтах можно решить обратную задачу и определить коэффициент турбулентной температуропроводности.

$$k = \frac{\pi}{\tau} \left(\frac{z_2 - z_1}{\ln \frac{A_1}{A_2}} \right)^2$$

Суточный ход температуры воды на разных горизонтах

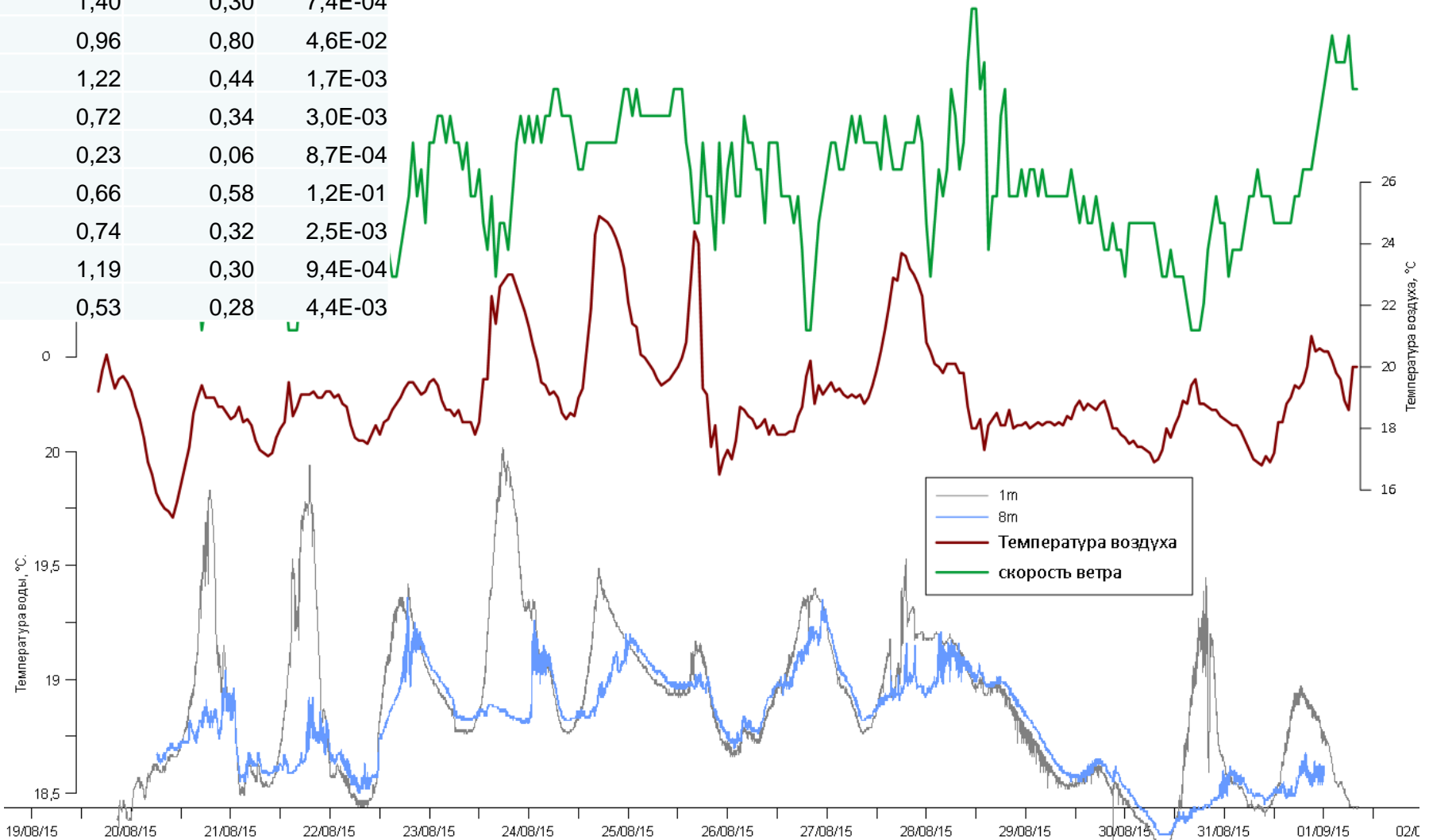


Хорошо видно проникновение тепловых волн от поверхности на глубину 10-13 м. Например: амплитуда первого дневного максимума 23.08 составила 1.2°C на горизонте 1 м, далее температура уменьшается с глубиной в геометрической прогрессии в соответствии с первым законом Фурье и на глубине 13 м амплитуда уменьшается до 0.1°C . Запаздывание по фазе происходит линейно, максимум на горизонте 1 м наблюдался в 15:00, в то время как максимум на глубине 13 м в 05:00 следующего дня.

Расчет коэффициента турбулентного перемешивания

Расчет K_t по данным о температуре воды на горизонтах 1 м и 8 м

A1	A8	K_t
1,30	0,41	1,3E-03
1,40	0,30	7,4E-04
0,96	0,80	4,6E-02
1,22	0,44	1,7E-03
0,72	0,34	3,0E-03
0,23	0,06	8,7E-04
0,66	0,58	1,2E-01
0,74	0,32	2,5E-03
1,19	0,30	9,4E-04
0,53	0,28	4,4E-03



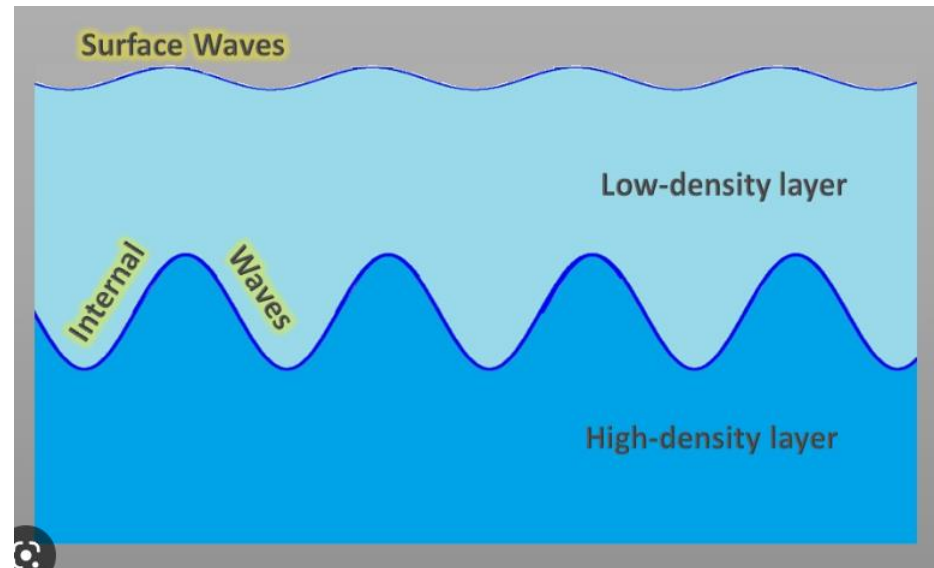
K_t (м²/с) **1,3E-03** **7,4E-04** **4,6E-02** **1,7E-03** **3,0E-03** **8,7E-04** **1,2E-01** **2,5E-03** **9,4E-04** **4,4E-03**

Внутренние волны

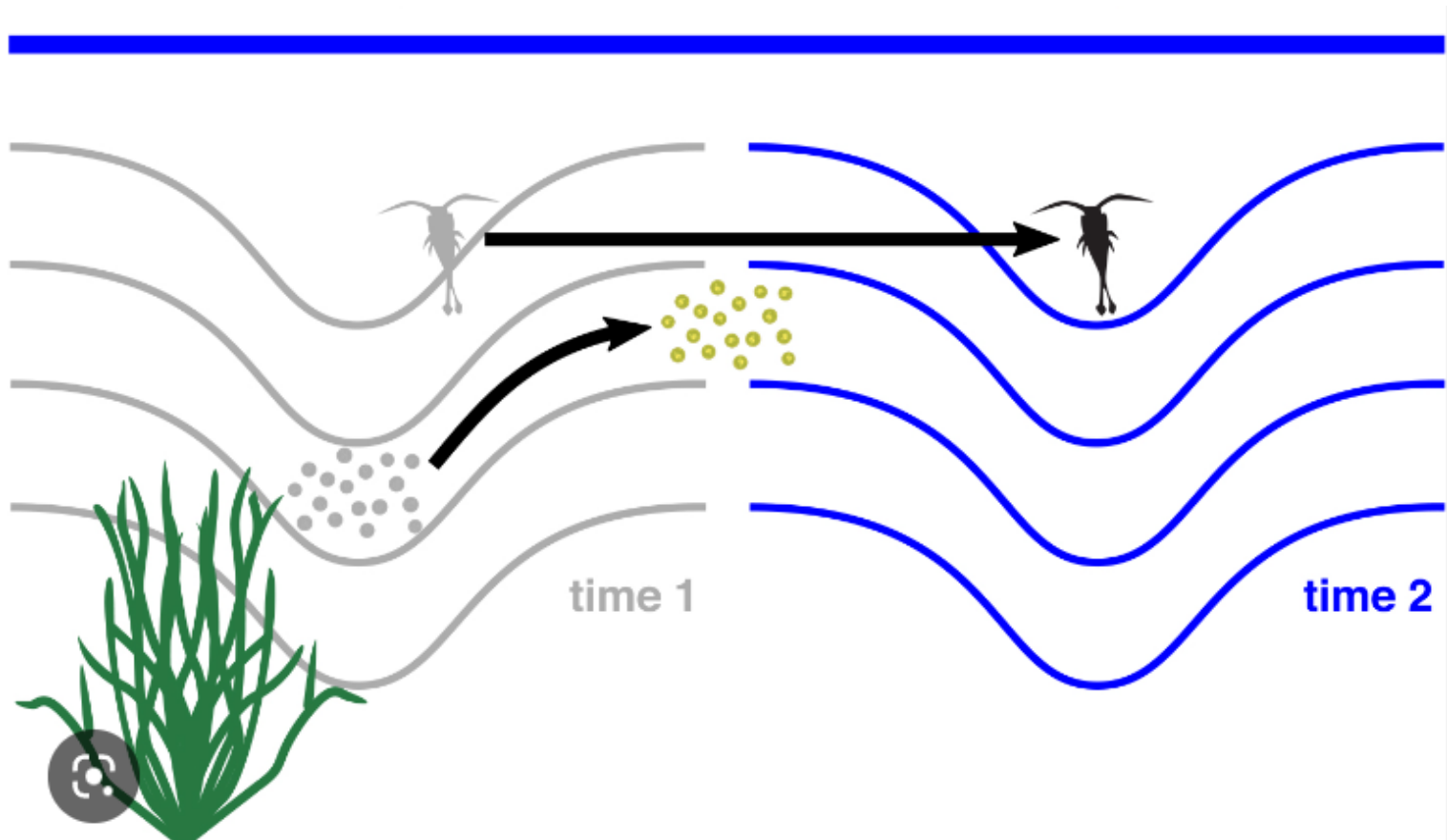
Внутренние волны возникают внутри водной массы на поверхности раздела слоев воды разной плотности при перемещении одного слоя относительно другого

Наиболее часто внутренние волны **возбуждаются приливом** около границы материкового склона, могут быть генерированы течением при обтекании неоднородностей дна, анемобарическими силами, нагонами, крупными ветровыми волнами, сдвиговой неустойчивостью течений. Высота океанских внутренних волн обычно значительно больше, чем высота волн на поверхности океана. Внутренние волны в океане имеют высоту 5-20 м или больше. Различают высокочастотные и низкочастотные внутренние волны, причём на морской поверхности отображаются только высокочастотные. Они имеют периоды от нескольких минут до нескольких часов, длины этих волн – от нескольких метров до нескольких километров, фазовая скорость высокочастотных волн – несколько десятков см/с.

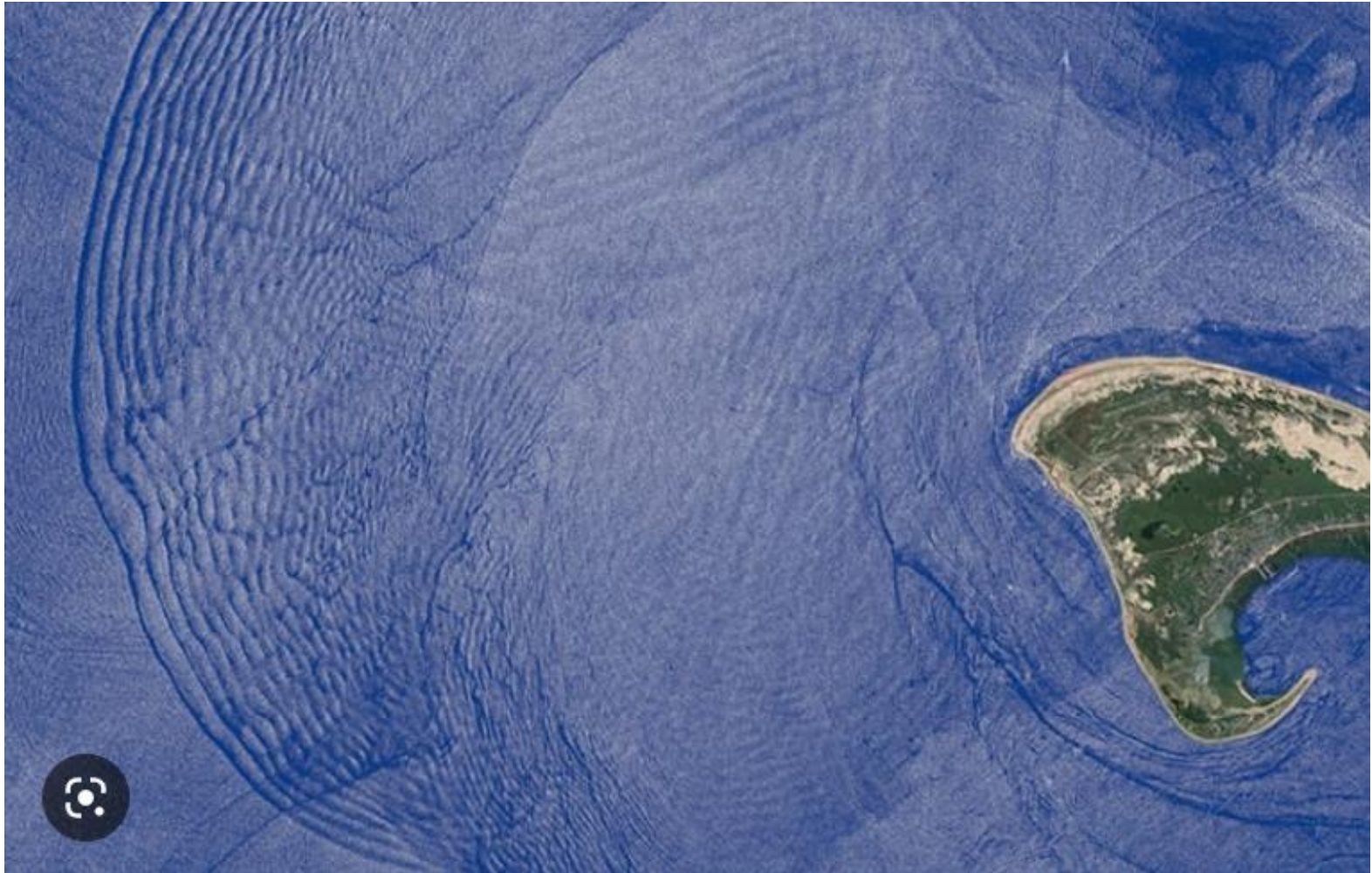
Внутренние волны являются неотъемлемой частью динамики вод Мирового океана. Такие волны наблюдаются повсеместно, даже в арктических областях. Сложно переоценить их влияние на процессы, происходящие в океане, такие как горизонтальный и вертикальный перенос импульса и энергии, турбулентное перемешивание. Внутренние волны также влияют на биологическую продуктивность морей, могут быть опасными для морских гидротехнических сооружений.



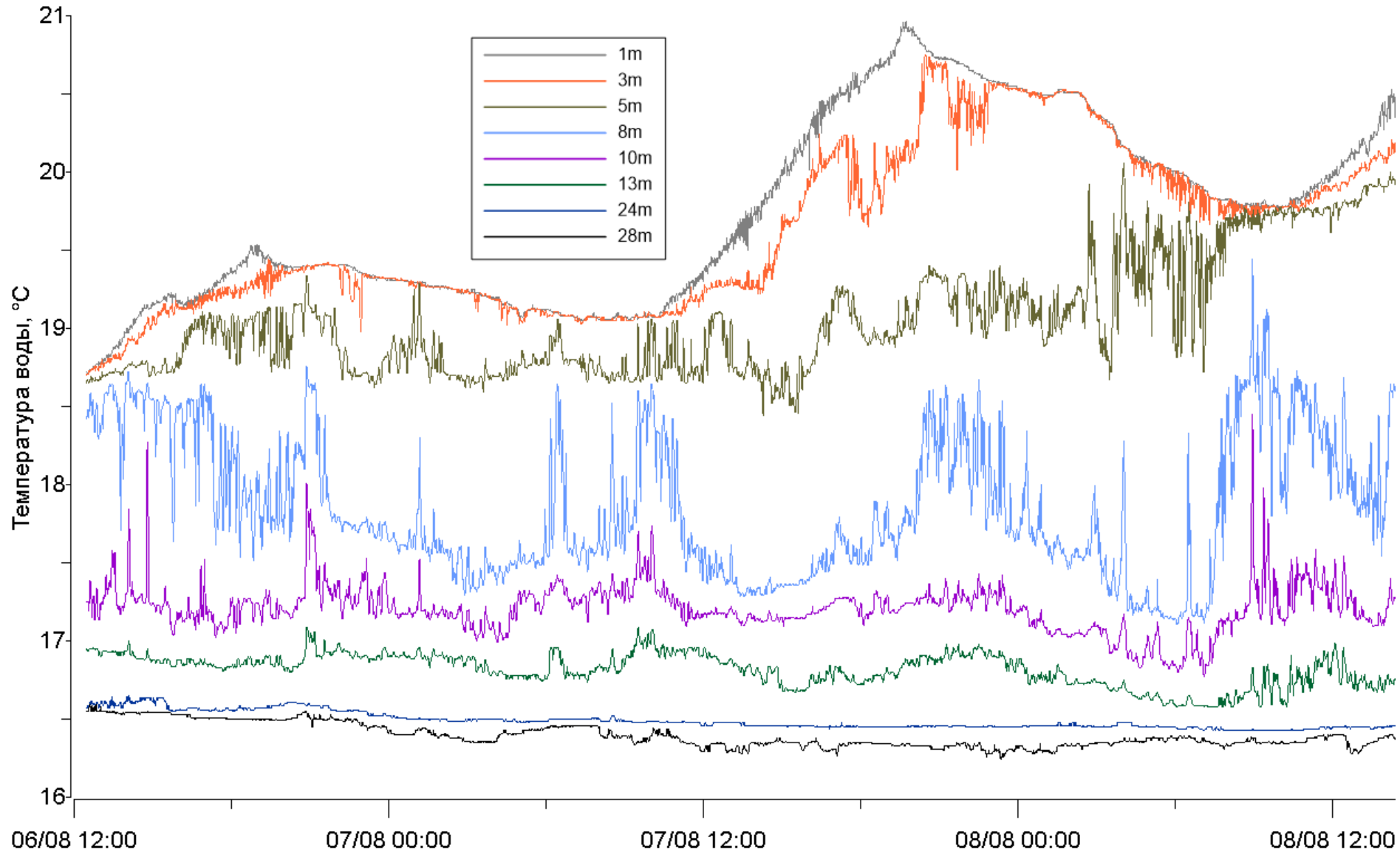
Внутренние волны



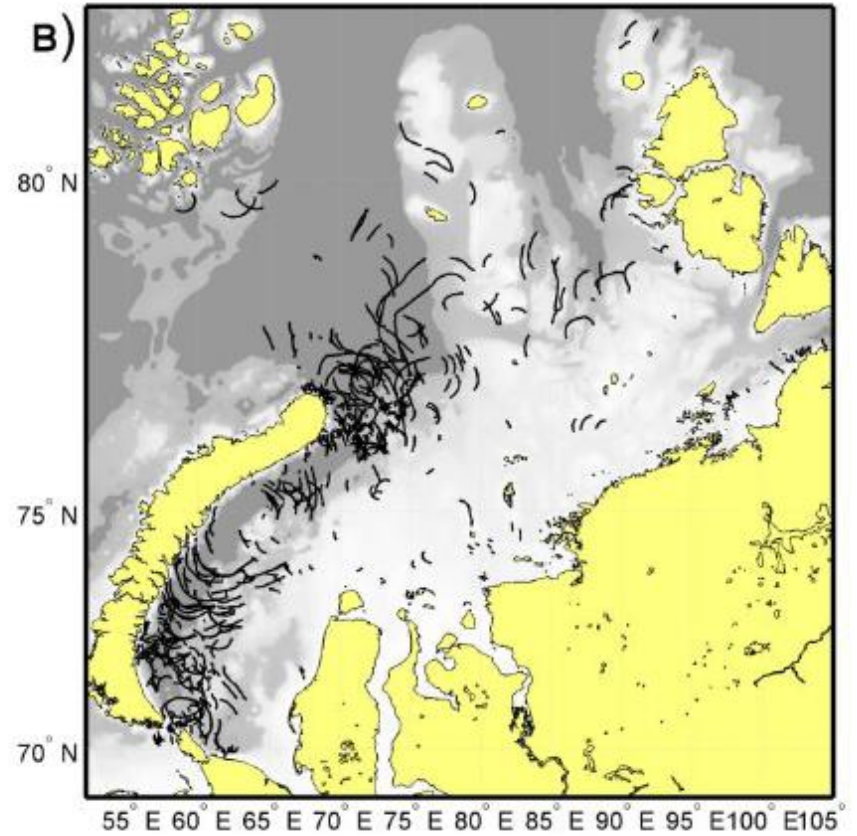
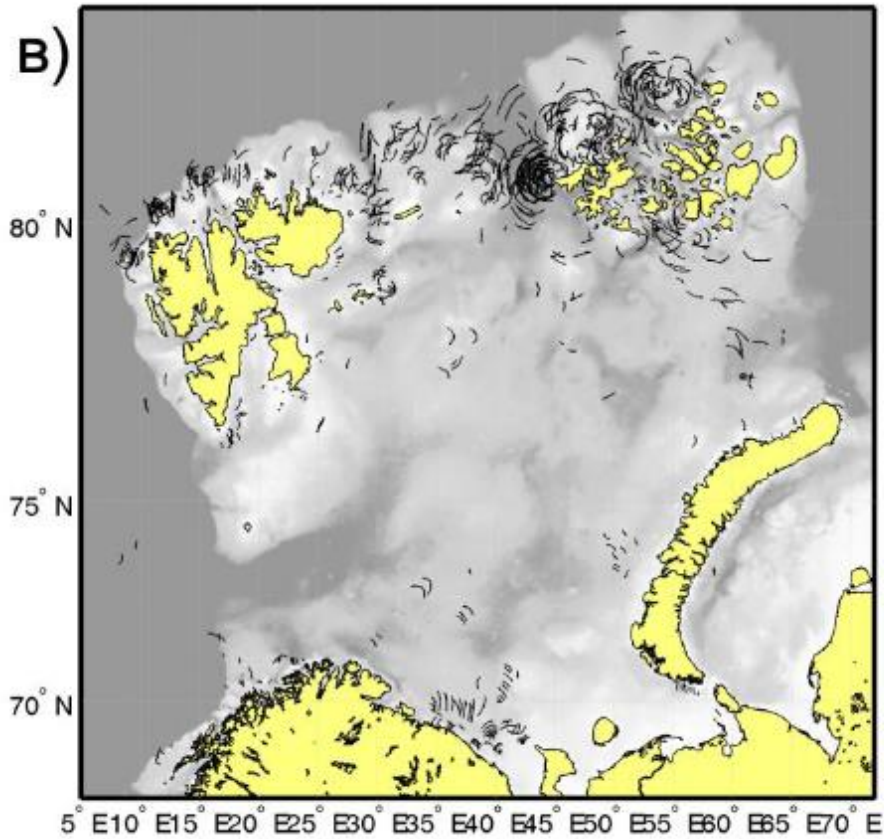
Внутренние волны



Внутренние волны



Внутренние волны в Баренцевом и Карском морях





Океаны МГУ

✓ Вы подписаны

https://vk.com/ocean_msu



Океаны МГУ
20 мар в 10:00



🌟 III ВСЕРОССИЙСКАЯ ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ»

Организатором школы выступает Геофизический центр Российской академии наук (ГЦ РАН) при поддержке Российского научного фонда.

III Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике» будет посвящена актуальным вопросам комплексного изучения и освоения арктического региона. Лекторами выступают ведущие российские ученые и специалисты, представляющие исследовательские организации и вузы страны.

- 📍 Когда? С 5 по 8 июня 2023 года
- 📍 Место проведения: Московская область, г. Видное, отель «Palmira Garden Hotel & Spa»

Важные даты:

- 🕒 20 марта - начало регистрации и приёма заявок на получение грантов для слушателей
- 🕒 14 апреля - окончание регистрации и приёма заявок на получение грантов для слушателей
- 🕒 28 апреля - оповещение о результатах рассмотрения заявок на получение грантов

❗ Слушатели могут получить грант, освобождающий от оплаты организационного взноса. Решение о предоставлении грантов будет объявлено 28 апреля Программным комитетом по итогам рассмотрения мотивационных писем, приложенных при регистрации.

❗ Слушателям, не получившим грант, будет предложено оплатить организационный взнос в размере 15 800 ₽, включающий трансфер из Москвы и обратно, проживание, питание, кофе-брейки, приветственный фуршет и дискуссионный ужин.