

Взаимодействие атмосферы и океана

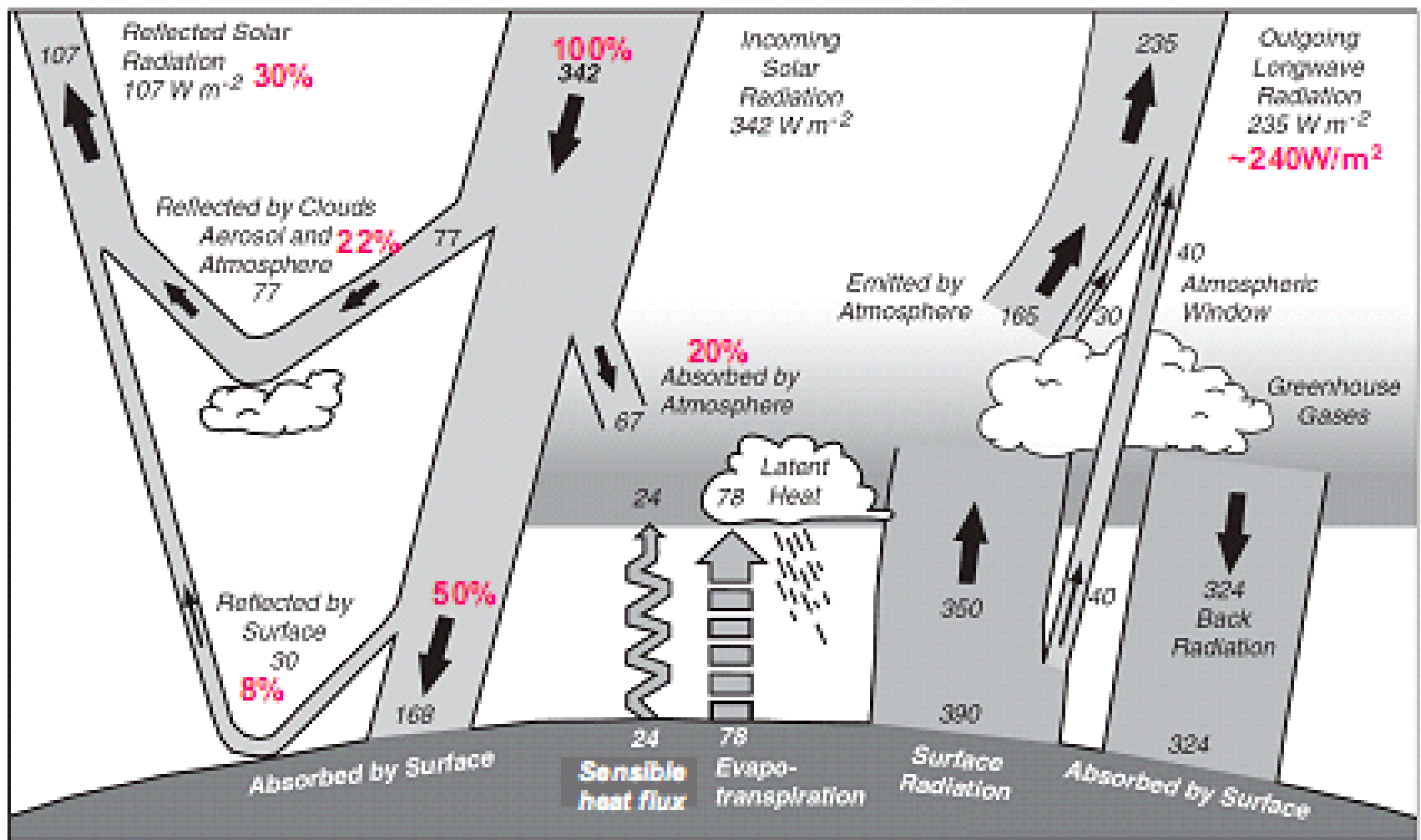


Ирина Репина
Лекция 1: Введение

Взаимодействие атмосферы и океана

Это перераспределение поступающей солнечной энергии через обменные процессы между океаном и атмосферой и связанные с ними процессы переноса энергии в атмосфере и океане.

- ❑ Связи в системе океан-атмосфера
- ❑ Граничные условия для океана и атмосферы
- ❑ Глобальный и региональный энергетический баланс в системе океан-атмосфера



Среднегодовой тепловой и радиационный баланс Земли

$$Q = Q_{SW} - Q_{LW} - Q_S - Q_L$$

$$Q = Q_{SW} - Q_{LW} - Q_S - Q_L$$

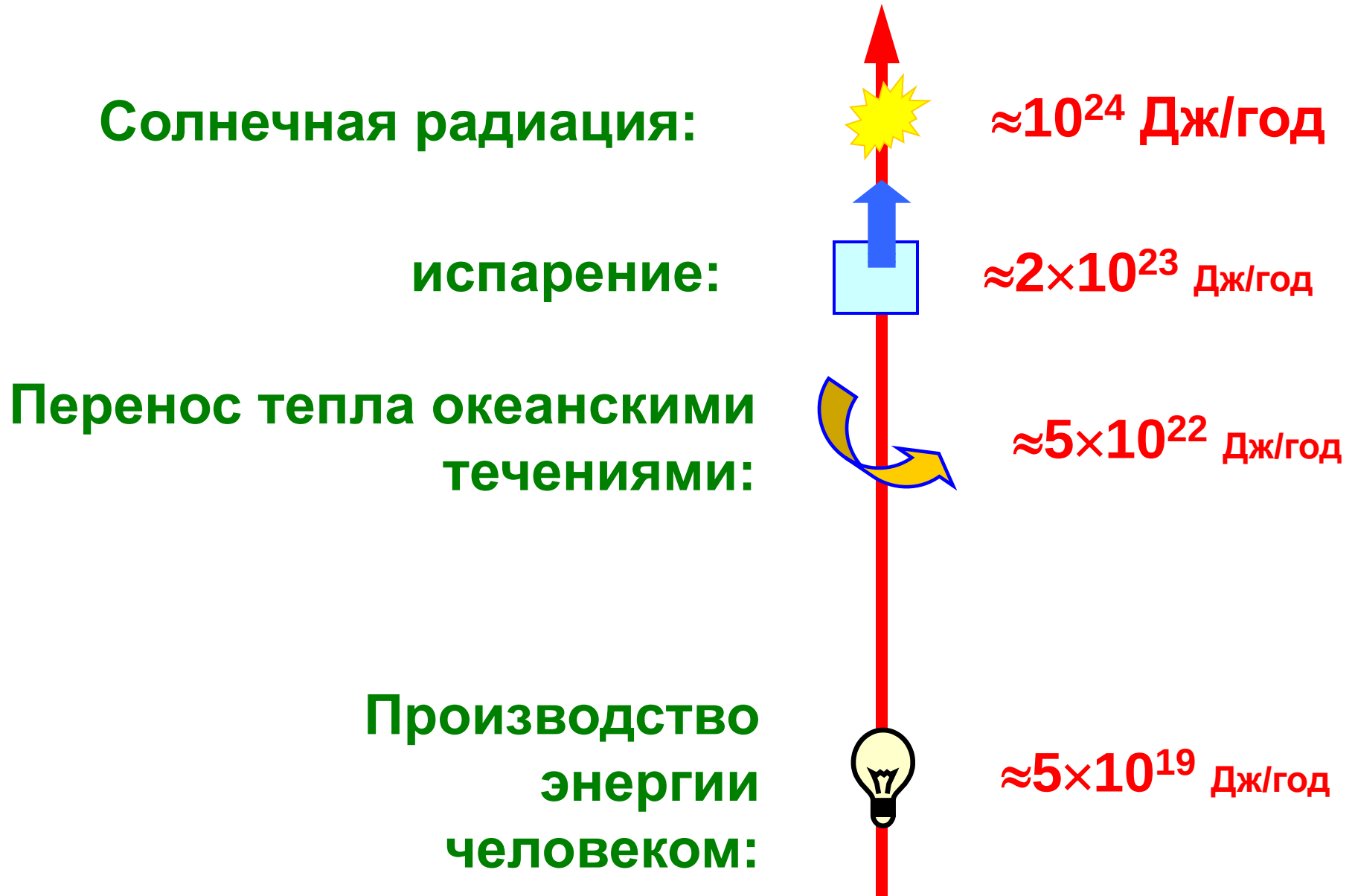
Q_{SW} – коротковолновый радиационный баланс

Q_{LW} – Длинноволновый радиационный баланс (Разница между длинноволновым излучением океана и атмосферы (парниковый эффект)).

Q_S (H , H_s) – Поток явного тепла. Поток тепла из-за турбулентного теплового переноса между двумя средами с разными температурами

Q_L (L , H_L) – Поток скрытого тепла (поток влаги). Поток тепла, переносимый испарением.

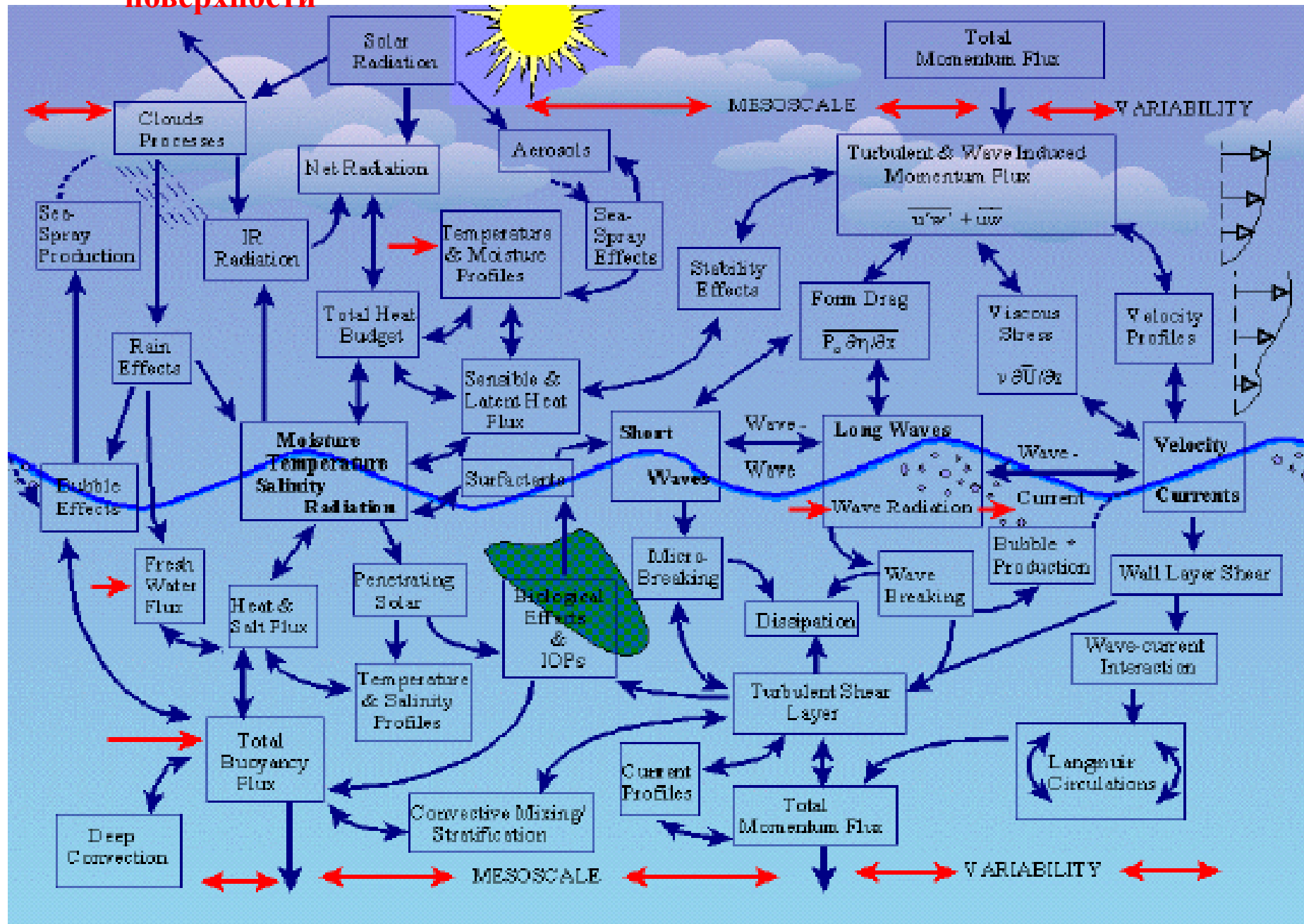
Общая оценка источников энергии в климатической системе



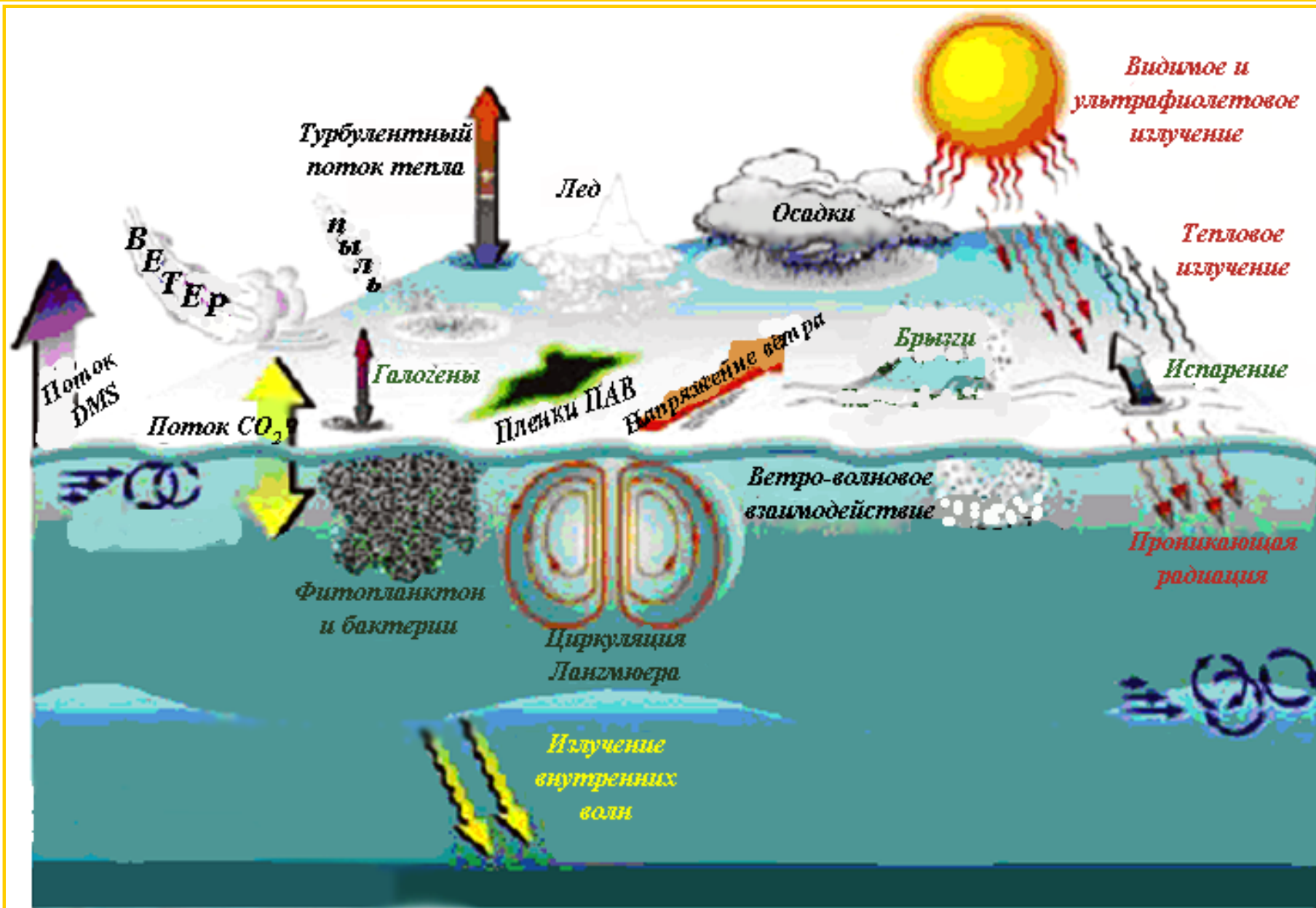
Морская вода и воздух

параметр	вода	воздух
Плотность	1025 kg/m^3	1.2 kg/m^3
Удельная теплоемкость ($p=\text{const}$)	$4.2 \times 10^3 \text{ J/(kg K)}$	$1 \times 10^3 \text{ J/(kg K)}$
Кинематическая вязкость	$0.8\text{-}1.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$	$12\text{-}15 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$
Толщина ламинарного подслоя $\delta \propto \nu/U$	10^{-5} m	10^{-6} m
Динамическая вязкость	$1 \times 10^{-3} \text{ Nsm}^{-2}$	$1 \times 10^{-3} \text{ Nsm}^{-2}$

Некоторые аспекты взаимодействия атмосферы и морской поверхности



Энерго- и массообмен между океаном и атмосферой



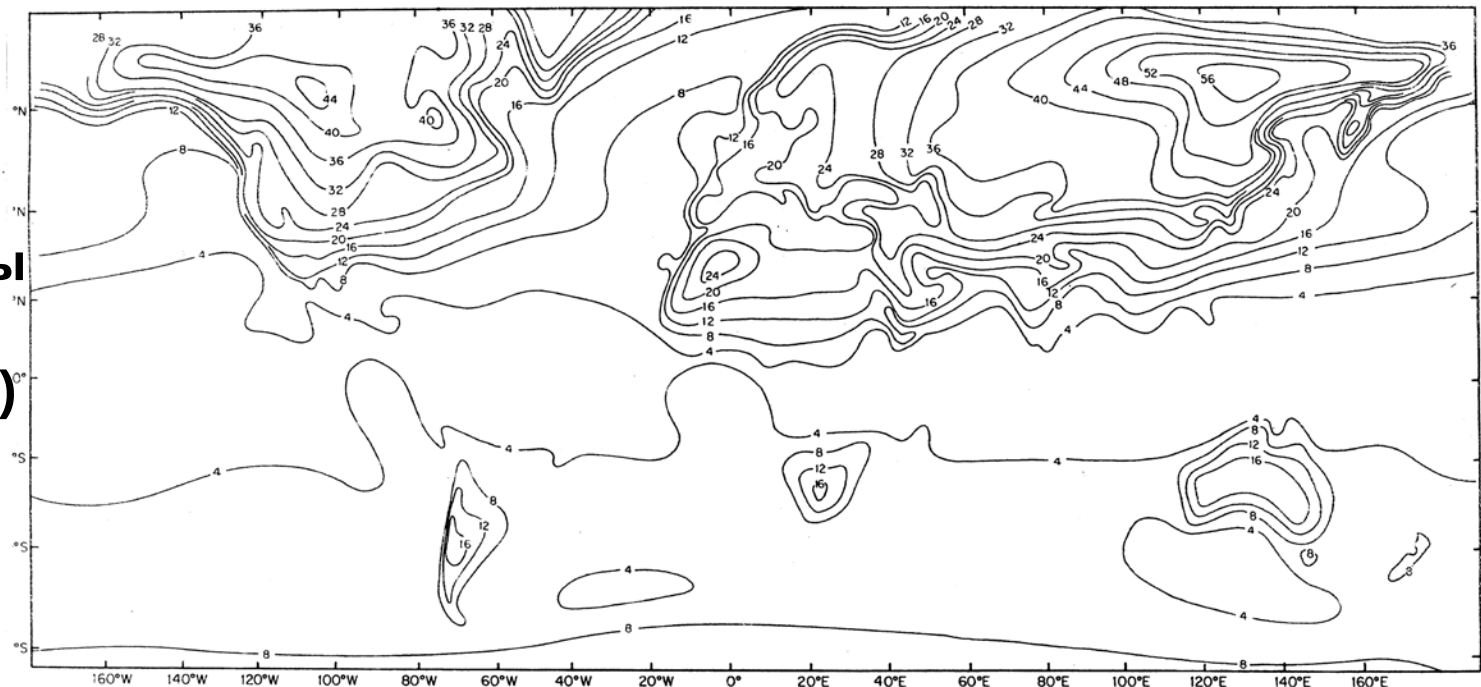
Основные процессы взаимодействия

1. Солнечная радиация (SW): поглощение, отражение и рассеяние
2. Тепловая радиация: поглощение, отражение и рассеяние
3. Турбулентный перенос тепла
4. Испарение
5. Осадки
6. Поток плавучести
7. Турбулентный перенос кинетической энергии (поток импульса)
8. Генерация ветровых волн
9. Перемешивание в атмосфере и генерация атмосферных вихрей в пограничном слое
10. Перемешивание в океане
11. Газообмен

Основные процессы взаимодействия

1. Адвекция тепла океанскими и атмосферными течениями
2. Нестабильность в океане и атмосфере
3. Генерация температурных аномалий в океане
4. Генерация циркуляционных аномалий в атмосфере

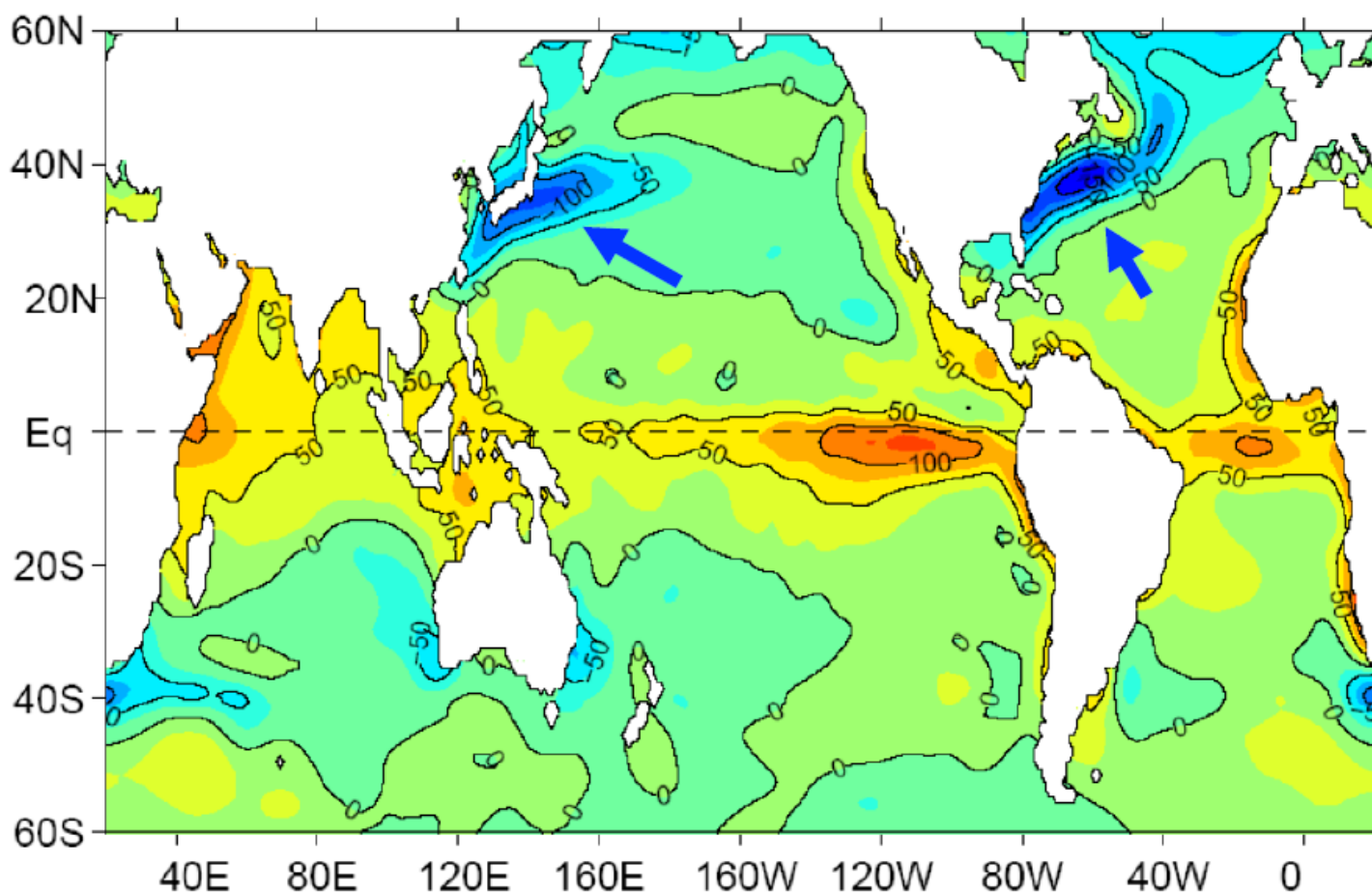
Годовая
амплитуда
температуры
воздуха
(Монин 1968)

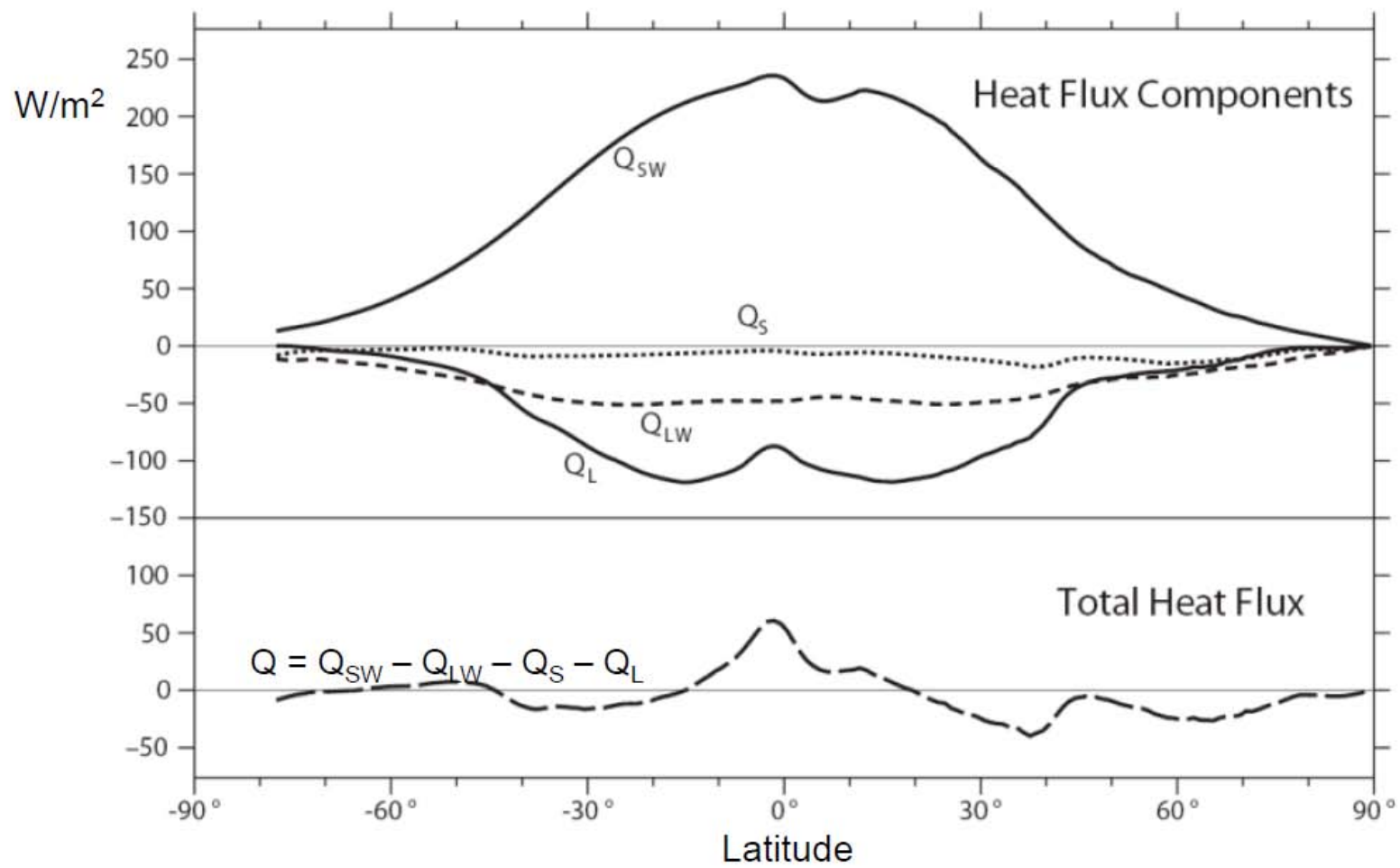


Некоторые процессы, которые возникают из-за переноса энергии, вещества и импульса между атмосферой и океаном и их масштабы

Процесс	Временной масштаб	Пространственный масштаб
Газообмен	1 с.	10^{-5} м
Поверхностные волны	10^{-2} - 10^2 с	10^{-3} – 10 м
Поток импульса	10^{-2} – 10 с	10^{-3} – 10 м
Морская турбулентность	1 – 10^3 с.	10^{-3} – 10^2 м
Циркуляция Лангмюера	10 – 10^3 с.	10^{-2} – 10^2 м
Атмосферная турбулентность	10^{-1} – 10^3 с	10^{-3} – 10^3 м
Ураганы	10^5 с	10^5 м
Эль-Ниньо	10^8 с	10^7 м

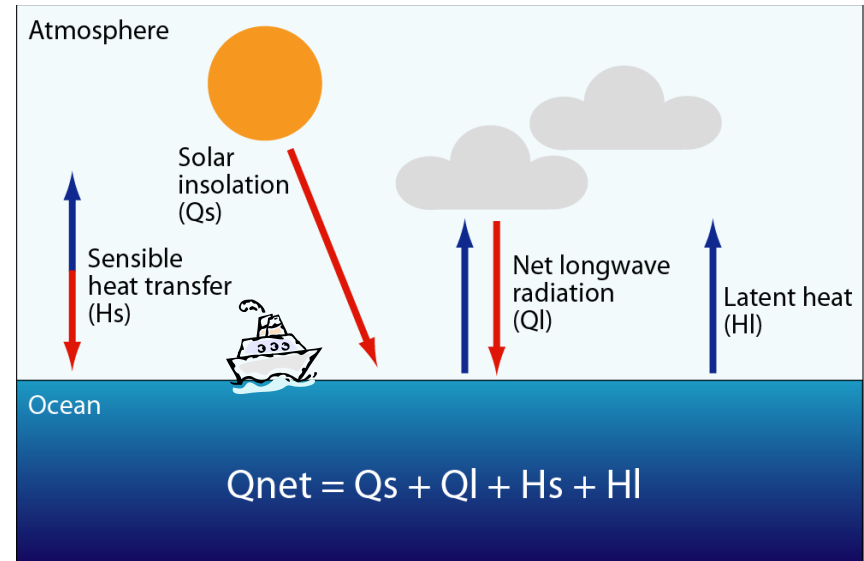
Суммарный поток тепла уходящий из океана





Тепловое взаимодействие атмосферы и океана

- Прямые методы требуют точных приборов и высокочастотных измерений. Поэтому количество качественных данных очень мало.
- Измерения определяющих потоки величин (U , T_a , T_s , q_s , q_a) доступны из судовых (буйковых) (VOS) и спутниковых данных.



Поток явного тепла

$$H_s = \rho_a C_p C_H U (T_s - T_a)$$

Плотность
воздуха

Теплоемко-
сть
воздуха

Коэффици-
ент
турбулентн-
ого обмена

Скорость
ветра

Разница
температур
вода-воздух

Поток влаги

$$H_l = \rho_a L_v C_E U (q_s - q_a)$$

Плотность
воздуха

Удельная
теплота
испарения

Коэффици-
ент
турбулентн-
ого обмена

Скорость
ветра

Разница
влажности вода-
воздух



$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left(\ln \frac{z}{z_0} \right)$$

U – средняя скорость ветра

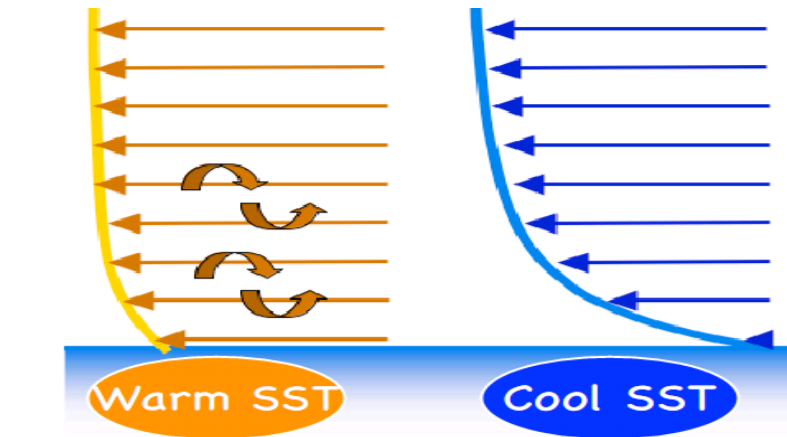
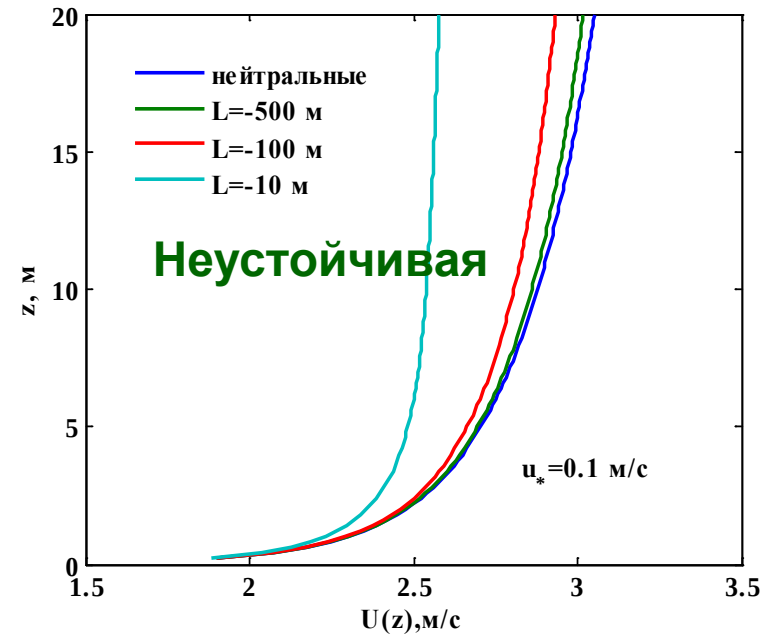
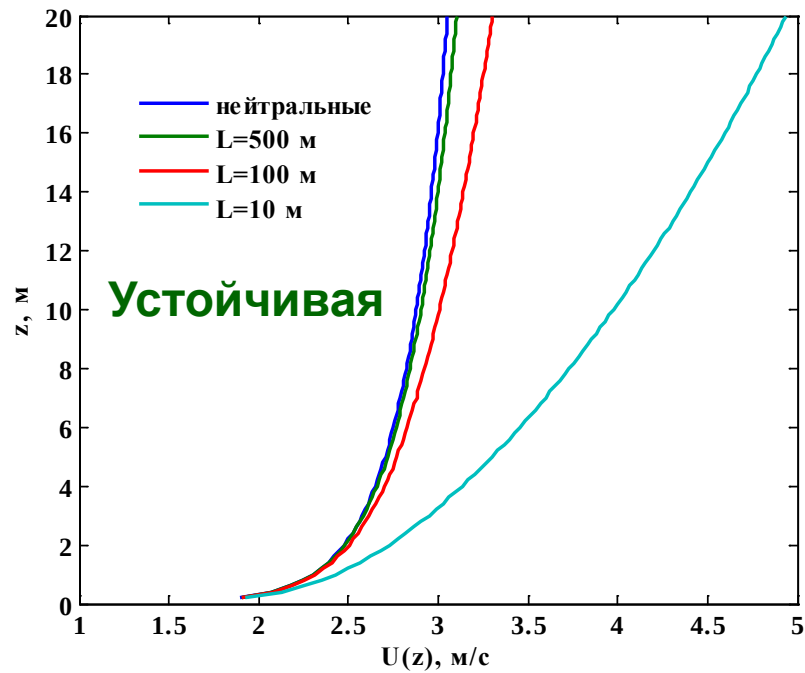
u^* - динамическая скорость

κ – постоянная Кармана

z – высота измерений

z_0 – параметр шероховатости

Отклонение профиля ветра от логарифмического при различных условиях стратификации



$$\bar{u}(z), \bar{w}(z), \bar{T}(z), \bar{q}(z)$$

$$u', w', T', q'$$

Отклонения

Height Above Ground

Средний поток

вихри

Турбулентность

Скорость ветра

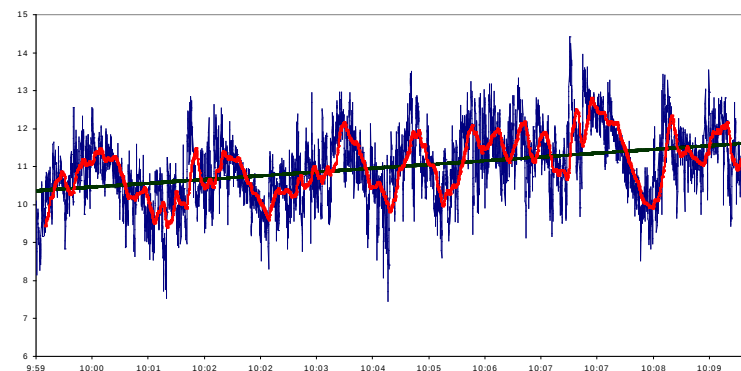
Средняя величина

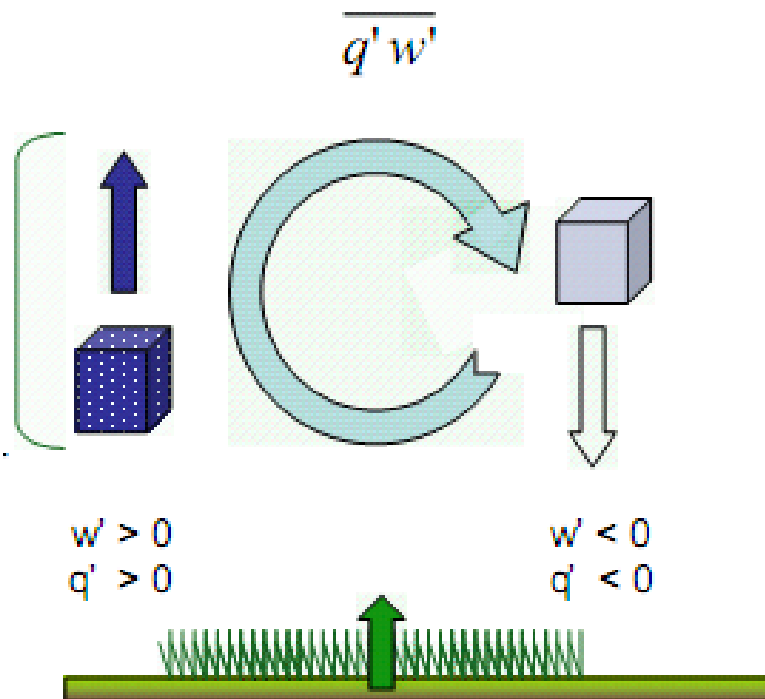
$$A = a + a^* + a'$$

a – среднее значение сигнала

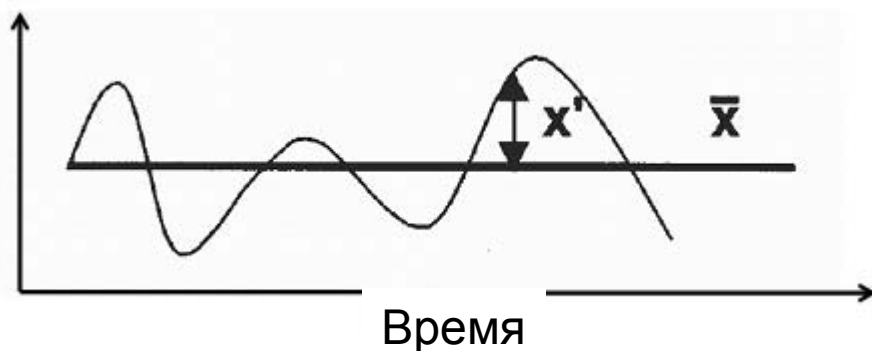
a^* - мезомасштабная составляющая

a' – пульсационная составляющая





Ковариации между отклонениями (пульсациями) температуры, влажности, скорости ветра, концентрации вещества и вертикальной скорости ветра определяют поток тепла, влаги, импульса и вещества.



$$\overline{w'x'} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} \left[(w_k - \overline{w_k})(x_k - \overline{x_k}) \right]$$

Измеряемые величины
 q, c, T, U, V, W
 10-20 Hz

$$s' = s - \bar{s}$$



$$\tau = -\rho_0 [\mathbf{i} \overline{u'w'} + \mathbf{j} \overline{v'w'}] = \rho_0 u_*^2 \quad \text{- поток импульса}$$

$$H = c_p \rho_0 \overline{w'T'} \quad \text{- Поток тепла}$$

$$L_E = \rho_0 \overline{w'q'} L_s \quad \text{- Поток влаги}$$

$$F_{co_2} = \overline{w'c'} \quad \text{- Поток углекислого газа}$$

$$\begin{aligned} \tau &= \rho C_D u_z^2 \\ H &= \rho c_p C_H u_z (T_0 - T_z) \\ L_E &= L_s C_E u_z (q_0 - q_z) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_D &= \left(\frac{u_*}{u_z} \right)^2 \quad \text{- Коэффициент сопр.} \\ C_H &= \frac{\overline{w'T'}}{u_z (T_0 - T_z)} \quad \text{- Число Стентона} \\ C_E &= \frac{\overline{w'q'}}{u_z (q_0 - q_z)} \quad \text{- Число Дальтона} \end{aligned}$$

Параметр шероховатости

$$z_0 = z \exp \left(-\frac{\kappa}{\sqrt{C_{Dn}}} \right)$$

Масштаб Монина-Обухова

$$L = -\frac{u_*^2 \rho c_p}{\kappa \beta H} \quad \beta = \frac{g}{T}$$

Теория подобия Монина-Обухова



Турбулентный режим на всех участках спектра, кроме интервала диссипации, полностью определяется тремя размерными параметрами:



$$u_* = \left(-\overline{u'w'} \right)^{1/2}$$

$$\frac{Q}{c_p \rho} = \overline{w'T'}$$

$$\frac{g}{T_0}$$

$$L = - \frac{u_*^3}{\kappa \frac{g}{T_0} \frac{Q}{c_p \rho}}$$

$$V = \frac{u_*}{\kappa}$$

$$T_* = - \frac{1}{\kappa u_*} \frac{Q}{c_p \rho}$$

$$T(z), U(z), q(z) = f(\zeta)$$

$$\zeta = z / L$$

- ❖ Рельеф местности плоский и подстилающая поверхность достаточно однородна, так что поля скорости ветра и температуры однородны по горизонтали
- ❖ Никаких резких изменений погоды не происходит, и в течение интервалов времени, в которых естественный суточный ход погоды мало заметен, поля скорости ветра и температуры статистически стационарны.

Профильный метод

Измерения метеоэлементов проводятся на нескольких уровнях, по известным формулам теории подобия находятся характеристики турбулентного режима u_* , θ_* , q_* и L , а затем и потоки скрытого и явного тепла:

$$\tau = \rho u_*^2$$

$$H = - \kappa c_p \rho u_* \theta_*$$

$$LE = \kappa u_* q_*$$



Аэродинамический метод (балк-формулы)

T – температуры воздуха и поверхности

q – влажность воздуха

U – скорость ветра.

$$\tau = \rho C_D u_z^2$$

$$H = \rho c_p C_H u_z (T_0 - T_z)$$

$$LE = L_s C_E u_z (q_0 - q_z)$$

C_D, C_H, C_E - безразмерные коэффициенты обмена
(коэффициент сопротивления, число Стентона и число
Дальтона соответственно)

Определение коэффициентов обмена в аэродинамических балк-формулах:

$$C_D = \frac{\tau_{turb}}{\rho_a U_{10}^2} = \frac{u_*^2}{U_{10}^2}$$

**Коэффициент сопротивления
морской поверхности**

$$C_H = \frac{\overline{w'T'}}{u_z(T_0 - T_z)}$$

- Число Стентона

$$C_E = \frac{\overline{w'q'}}{u_z(q_0 - q_z)}$$

- Число Дальтона

Из выводов теории подобия:

$$C_D^{-1/2} = C_{Dn}^{-1/2} - \frac{\Psi_u(z/L)}{K}$$

$$C_H = \alpha_T C_D \frac{\left[\ln \frac{z}{z_0} - \Psi_u(z/L) \right]}{\left[\ln \frac{z}{z_T} - \Psi_T(z/L) \right]}$$

$$C_E = \alpha_q C_D \frac{\left[\ln \frac{z}{z_0} - \Psi_u(z/L) \right]}{\left[\ln \frac{z}{z_q} - \Psi_q(z/L) \right]}$$

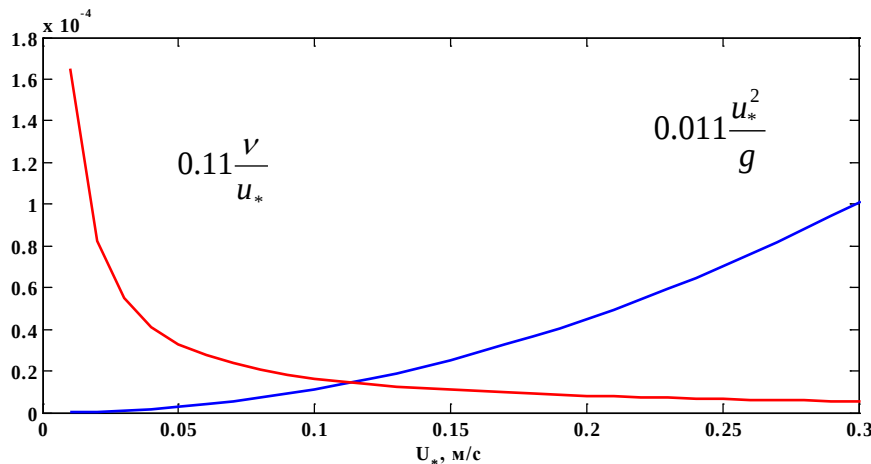


- Эффекты стратификации
- Эффекты неоднородности подстилающей поверхности
- Влияние зыби

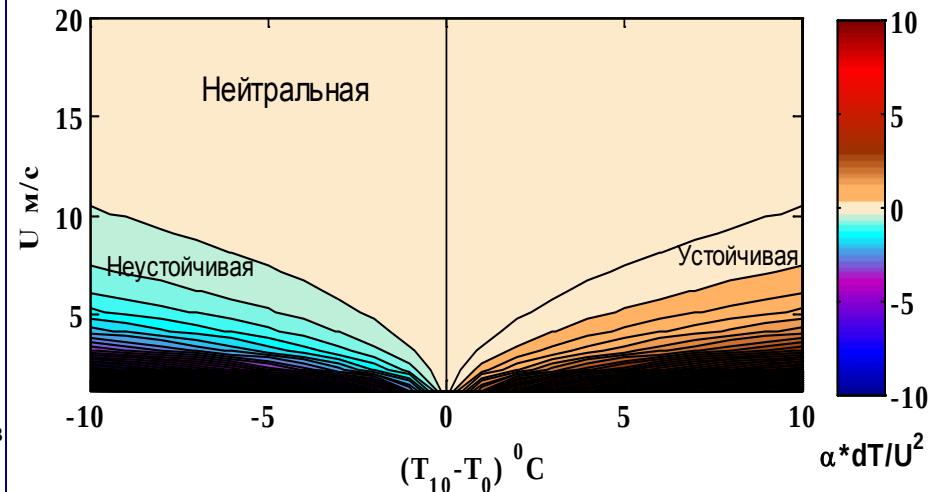
Необходима разработка параметризаций, учитывающих влияние стратификации атмосферы

Зависимость от динамической скорости составляющих формулы

$$z_0 = 0.011 \frac{u_*^2}{g} + 0.11 \frac{\nu}{u_*}$$



Зависимость параметра стратификации атмосферы от метеорологических условий.





Устойчивые пограничные слои



Морская поверхность при сильных ветрах



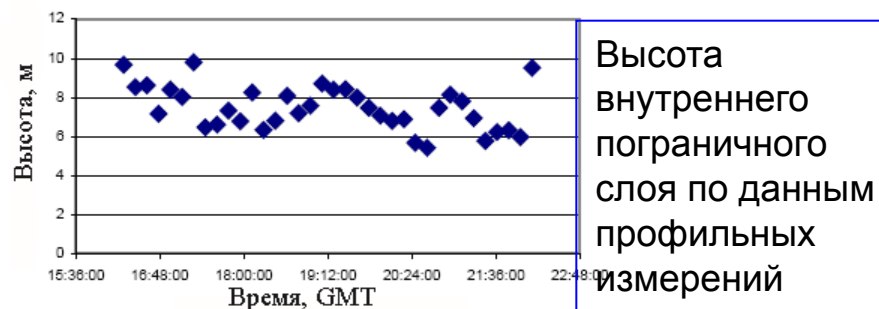
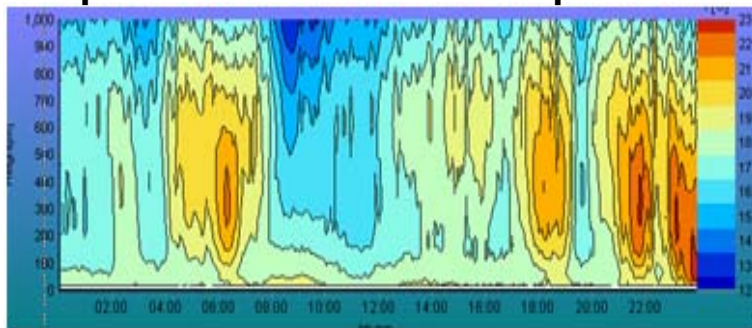
1. Наличие пены и брызг (дополнительно к температурной стратификации образуется устойчивая стратификация атмосферы по плотности в нижнем слое).
2. Изменение характеристик волнения

Разработка параметризаций с учетом влияния пены и брызг

Взаимодействие атмосферы и морской поверхности в прибрежных районах



Профили температуры в пограничном слое атмосферы при береговом ветре на расстоянии 500 м. от берега



Высота
внутреннего
пограничного
слоя по данным
профильных
измерений

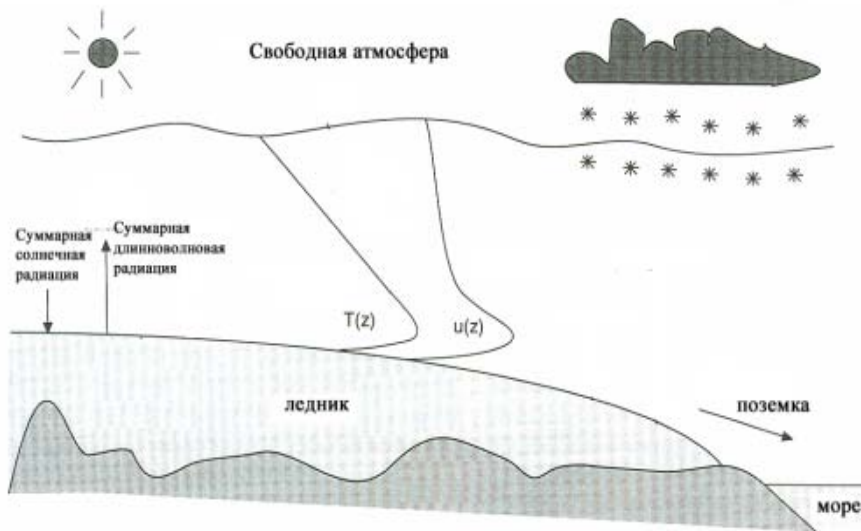
1. Зависимость характеристик турбулентного обмена от направления ветра (образование внутренних пограничных слоев при береговых ветрах)
2. Рельеф береговой зоны в значительной степени определяет структуру пограничного слоя над морем при ветре с берега.
4. Порывистость береговых ветров
5. Различие характеристик морского волнения в открытом море и на мелководье.
6. Апвеллинги. Большая вероятность наличия экстремальных стратификаций.

Учет факта, что профили средней скорости ветра и интенсивность турбулентности существенно отличаются от характеристик пограничного слоя, типичного для условий открытого моря.

Кatabатические ветры в прибрежных зонах



Возникновение стоковых (катабатических) ветров в полярных районах связано с сильным охлаждением воздуха на склонах ледниковых плато и движением его под действием силы тяжести вниз по склону. Эти ветры оказывают значительное влияние как на климат данных регионов, так и на энергетический баланс в зоне ледника.



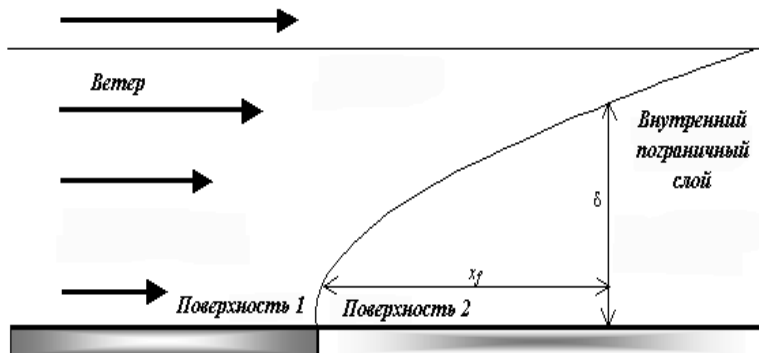
Катабатический поток очень мал по высоте, обычно несколько десятков метров с максимумом скорости ветра всего в нескольких метрах от поверхности. Поэтому применение теории подобия для вычисления турбулентных потоков тепла и влаги из стандартных профилей скорости ветра, температуры и влажности не всегда возможно.

Взаимодействие атмосферы и океана в полярных районах



Характерные черты ледяного покрова

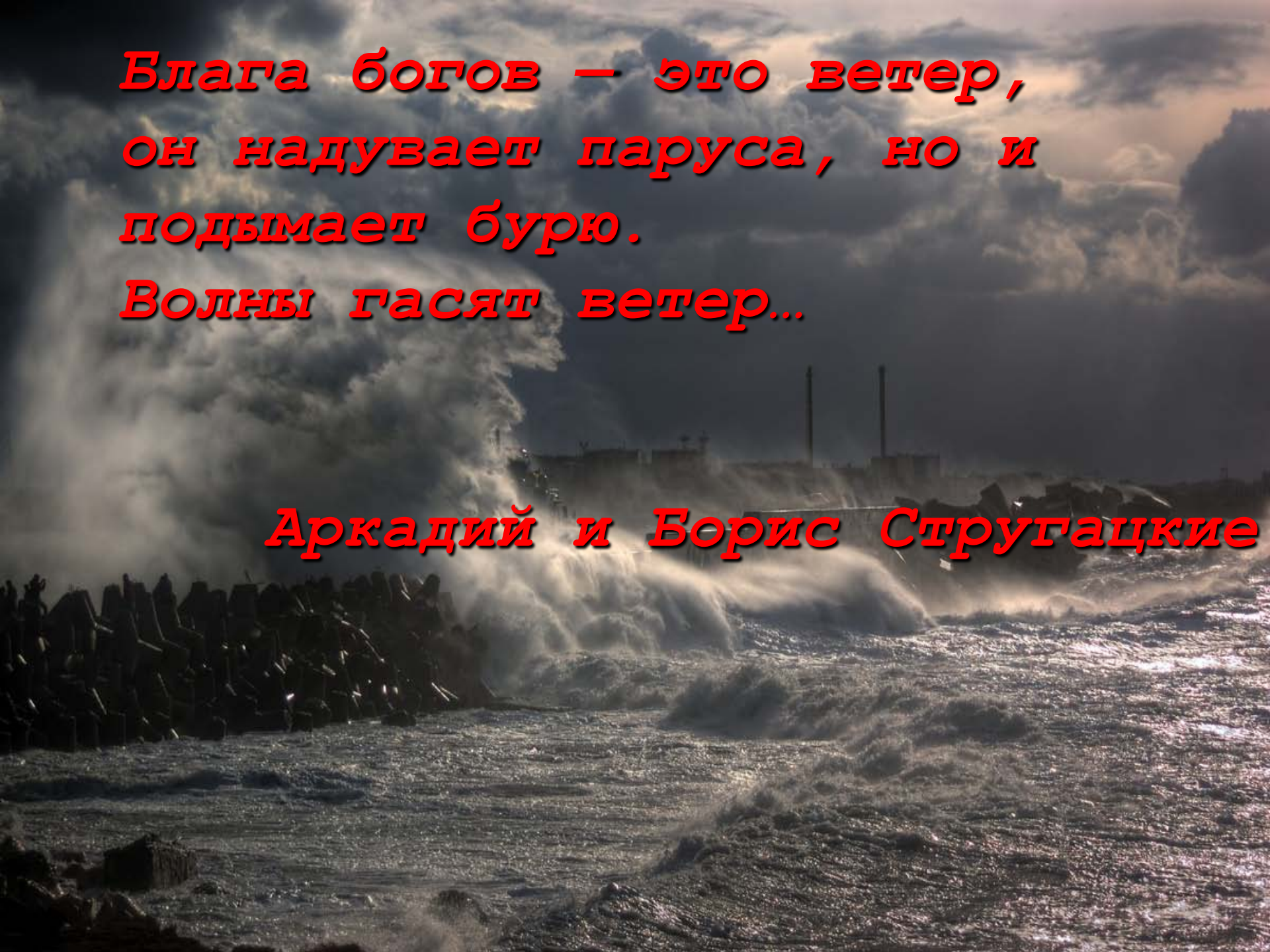
- Горизонтальная изменчивость
 - мелкомасштабная (м, км)
 - крупномасштабная (регионы)
- Вертикальная изменчивость
- Временная изменчивость
- Пространственная неоднородность



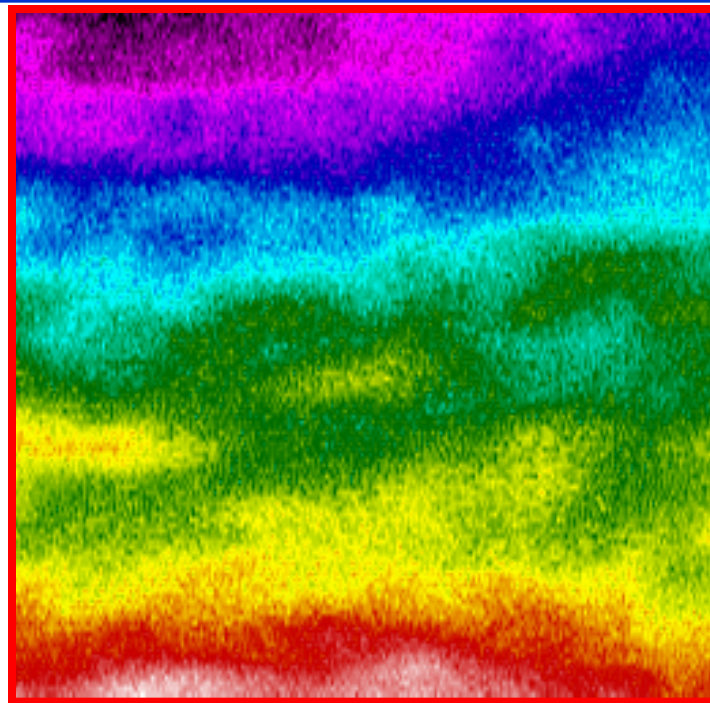
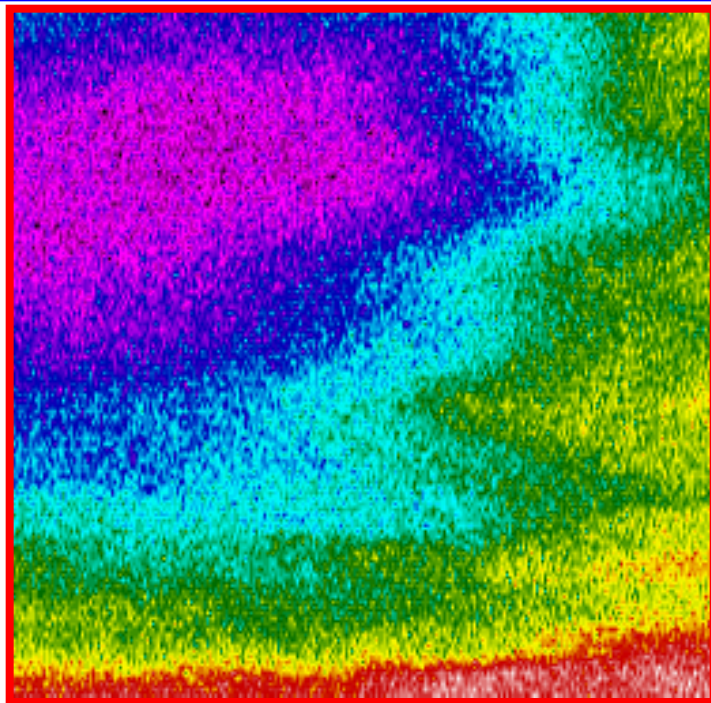
Разработка параметризаций обмена для различных типов характерных для льда поверхностей. Учет различия поверхностей в моделях.

**Блага богов — это ветер,
он надувает паруса, но и
поднимает бурю.
Волны гасят ветер...**

Аркадий и Борис Стругацкие



Термограмма слика



Спасибо за внимание!

