

Сергей А. Лебедев <sup>1,2</sup>, Андрей Г. Костяной <sup>3</sup>



<sup>1</sup> Геофизический центр РАН

<sup>2</sup> Майкопский государственный технологический университет

<sup>3</sup> Институт Океанологии им. П.П. Ширшова РАН

# Оценка климатической изменчивости водообмена между частями Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии



Десятая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 9– 12 апреля 2019г.

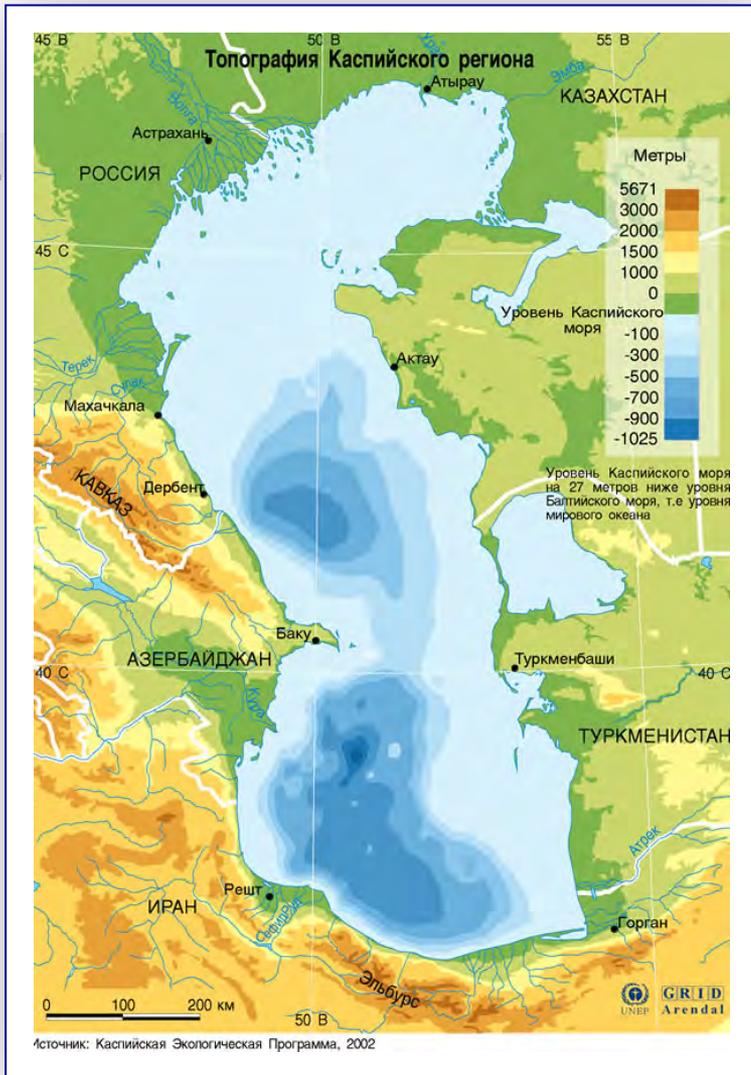
© 2020, С.А. Лебедев, А.Г. Костяной



# Каспийское море

Каспий является внутренним морем, расположенным в обширной материковой депрессии на границе Европы и Азии. Это крупнейший замкнутый водоем мира, и только изоляция от Мирового океана отличает его от открытых морей. Все остальные признаки водоема: размеры, глубины, особенности термохалинной структуры и циркуляции вод – позволяют отнести его к типу глубоких внутренних морей.

Каспийское море вытянуто по меридиану более чем на  $10^\circ$  (от  $36^\circ 33'$  до  $47^\circ 07'$  с.ш. ), что составляет около 1 200 км, при средней ширине примерно 310 км. Площадь моря при отметке уровня -27,5 м (в Балтийской системе высот) составляет 386 400 км<sup>2</sup>.

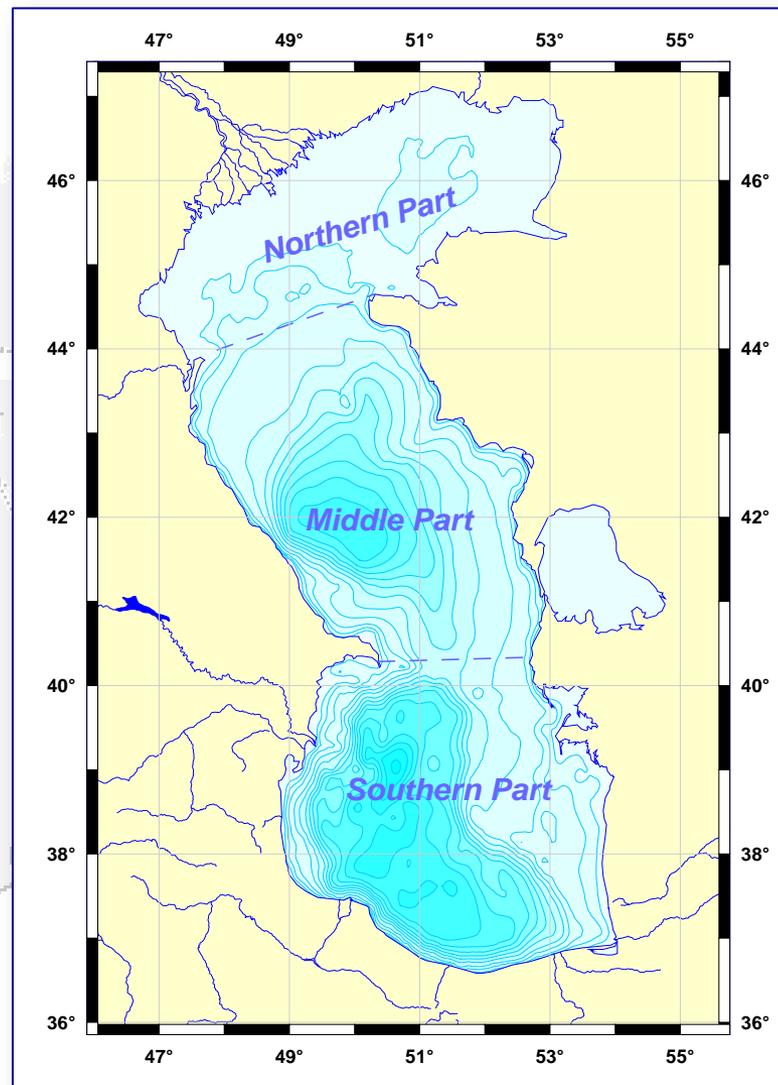


# Водообмен между частями Каспия

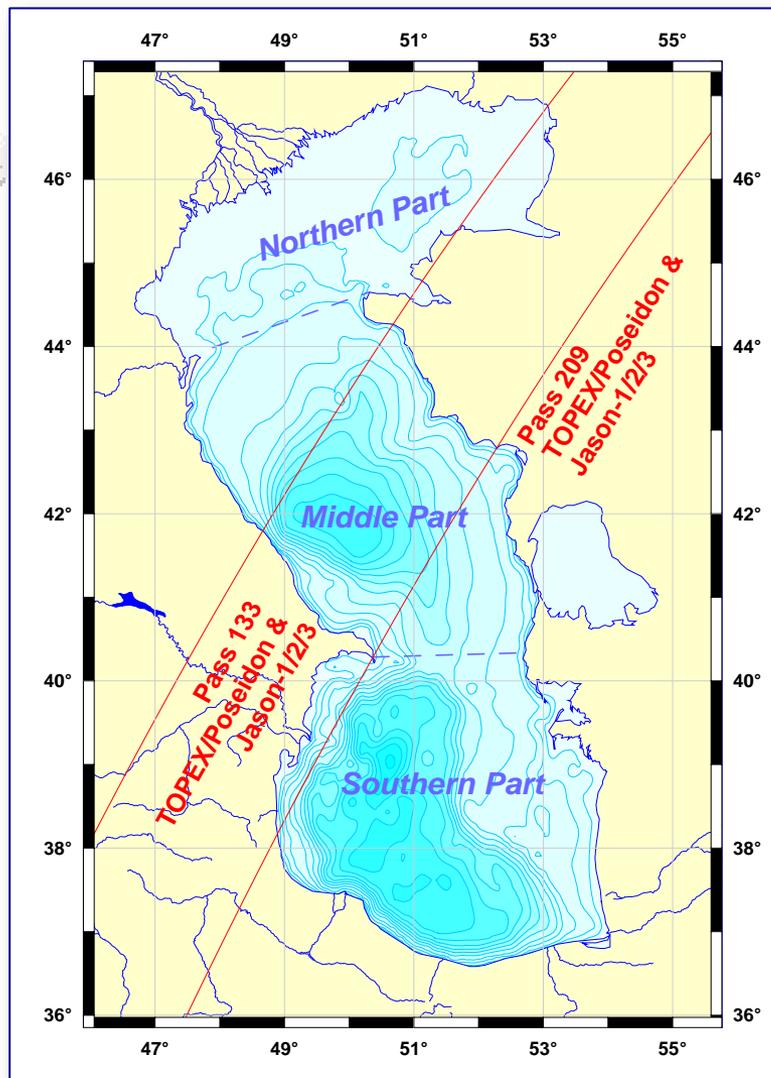
По физико-географическим условиям и характеру рельефа дна море можно подразделить на три части: Северный, Средний и Южный Каспий.

Водообмен между Северным, Средним и Южным Каспийским морем играет важную роль в морском солевом балансе и существенно влияет на его экологическое состояние и трансграничный транспорт.

В настоящее время расчет водообмена между различными частями моря осуществляется только с использованием приближенных формул или на основе результатов численного моделирования термогидродинамики моря. В данном докладе предлагается оценка сезонной и межгодовой изменчивости аномалий водообмена с использованием данных спутниковой альтиметрии.



# Используемые данные



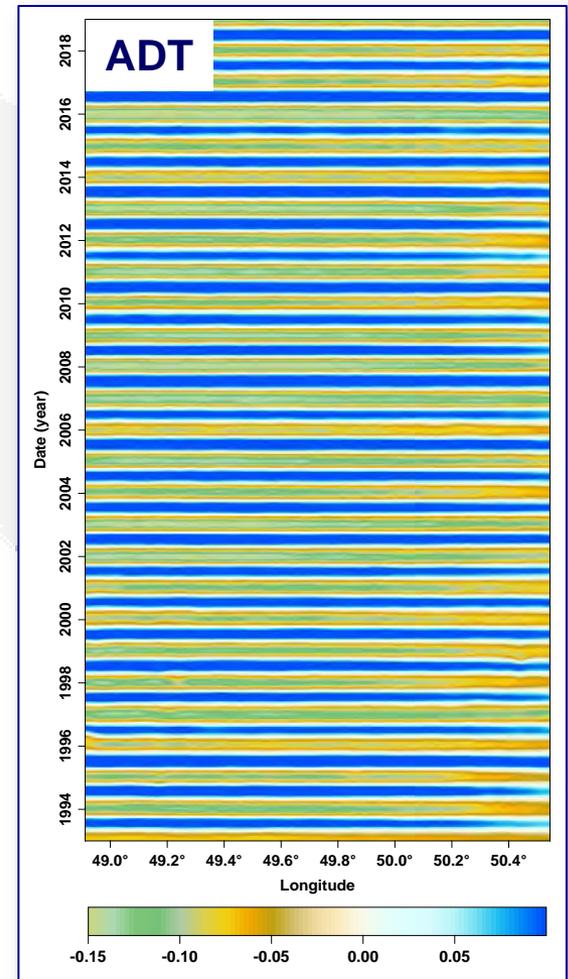
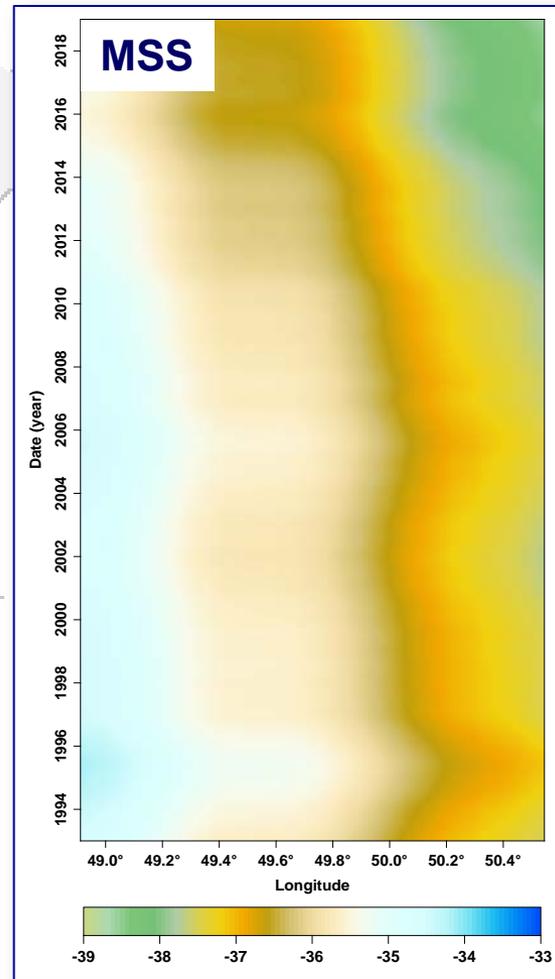
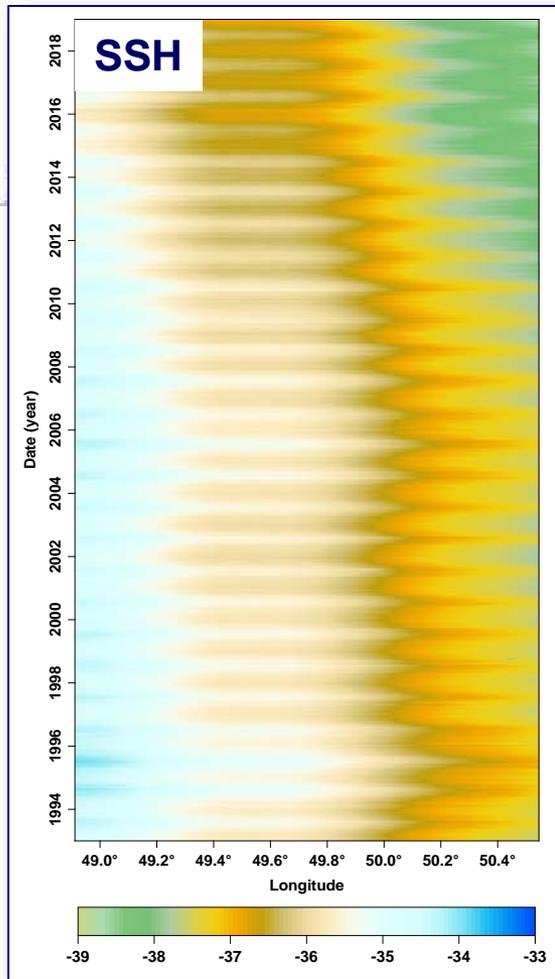
Для работы были выбраны данные альтиметрических измерений вдоль 133 и 209 треки спутников TOPEX/Poseidon (Т/Р) и Jason-1/2/3 (J1/2/3), которые расположены под углом  $\sim 15^\circ$  к границам Северного, Среднего и Южного Каспийского моря.

Данные спутника Т Р и J1/2/3 были использованы, потому что:

- ➔ Период повтора ( $\sim 9,916$  дней) близок к характерному временному масштабу основных гидрологических и гидродинамических явлений.
- ➔ Данные Т/Р представляют наиболее длинные временные ряды альтиметрических измерений (сентябрь 1992 г. - август 2002 г.) с возможностью их расширения по данным J1 (январь 2002 г. - январь 2009 г.), данным J2 (август 2008 г. - май 2016 г.) и J3 данные (январь 2016 г. - настоящее время).



# Расчет аномалий динамической топографии вдоль 133 трека



**Временная изменчивость высоты поверхности моря (SSH) (м),  
средней высоты поверхности моря (MSS) (м) по модели GCRAS18 и  
аномалий динамической топографии (ADT) (м) вдоль 133 трека**

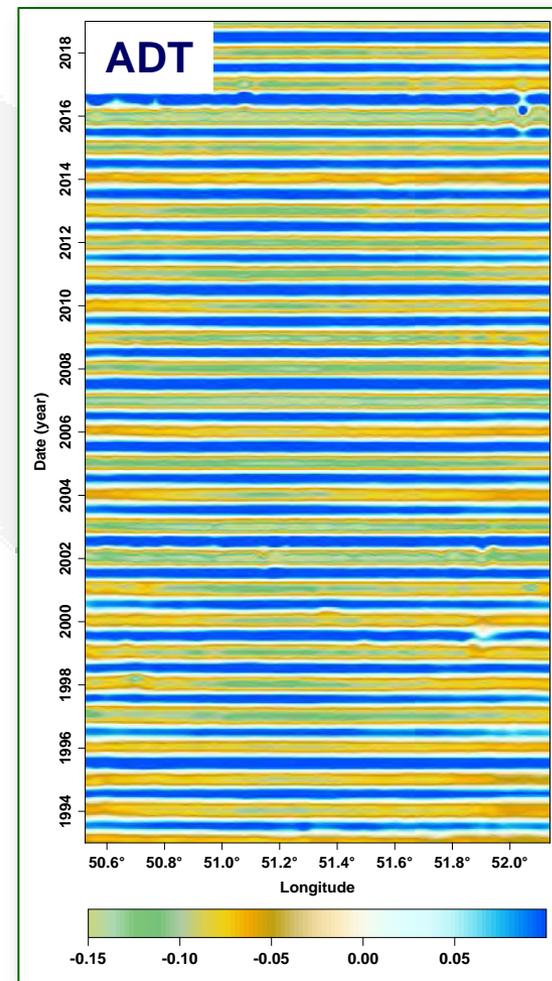
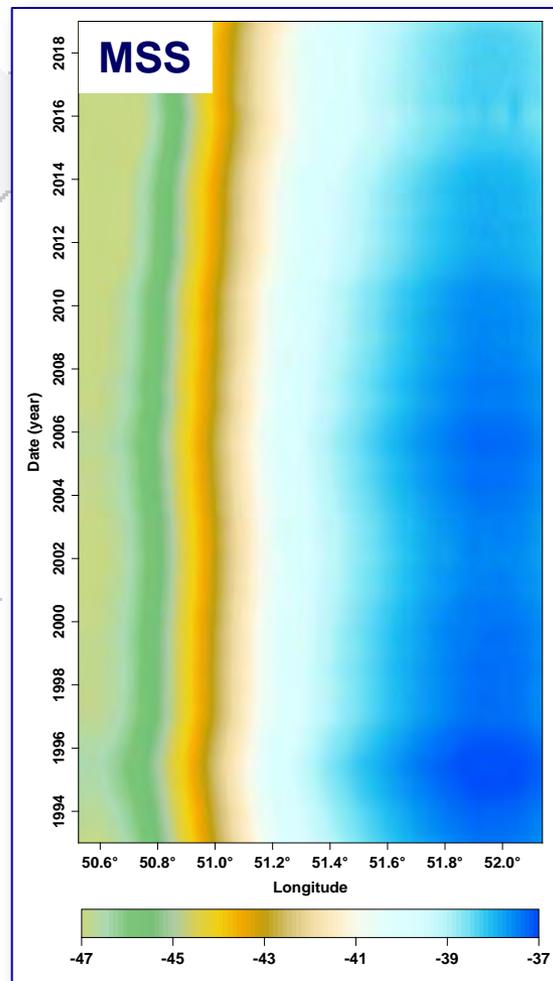
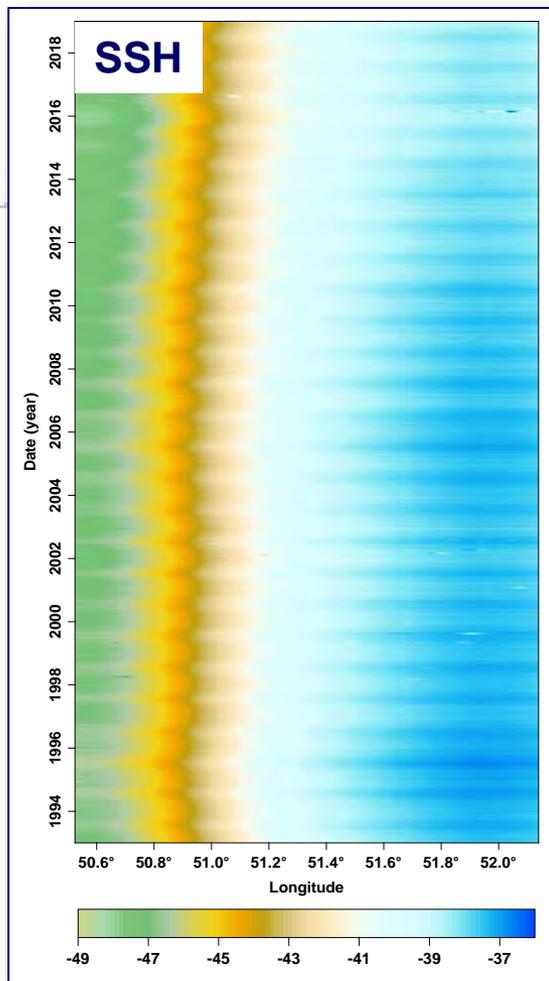


Десятая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 9–12 апреля 2019г.

© 2020, С.А. Лебедев, А.Г. Костяной



# Расчет аномалий динамической топографии вдоль 209 трека



**Временная изменчивость высоты поверхности моря (SSH) (м),  
средней высоты поверхности моря (MSS) (м) по модели GCRAS18 и  
аномалий динамической топографии (ADT) (м) вдоль 209 трека**



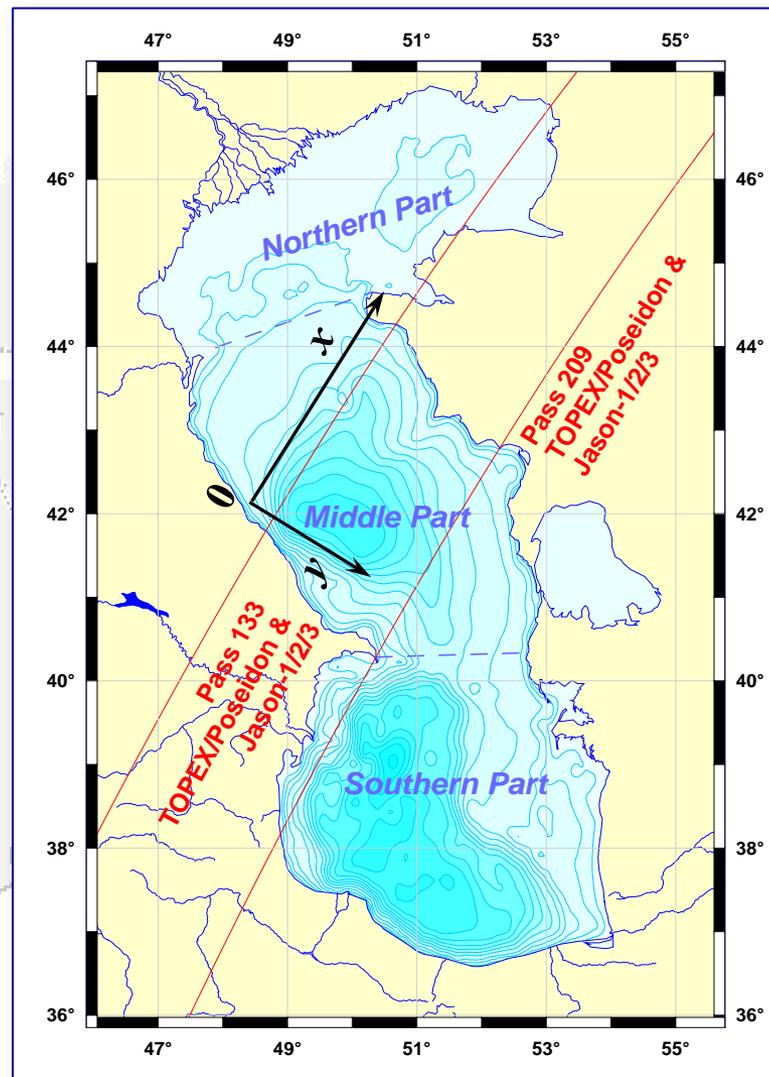
# Методика

Согласно геострофическому приближению, зональная составляющая скорости поверхностного течения  $u_y$  (вдоль оси абсцисс) определяется как:

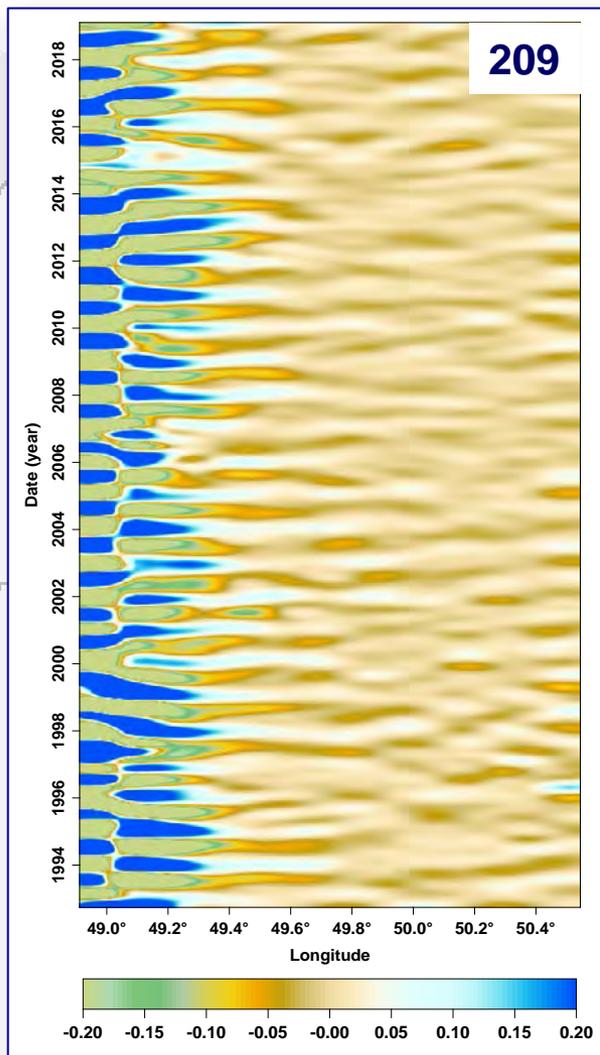
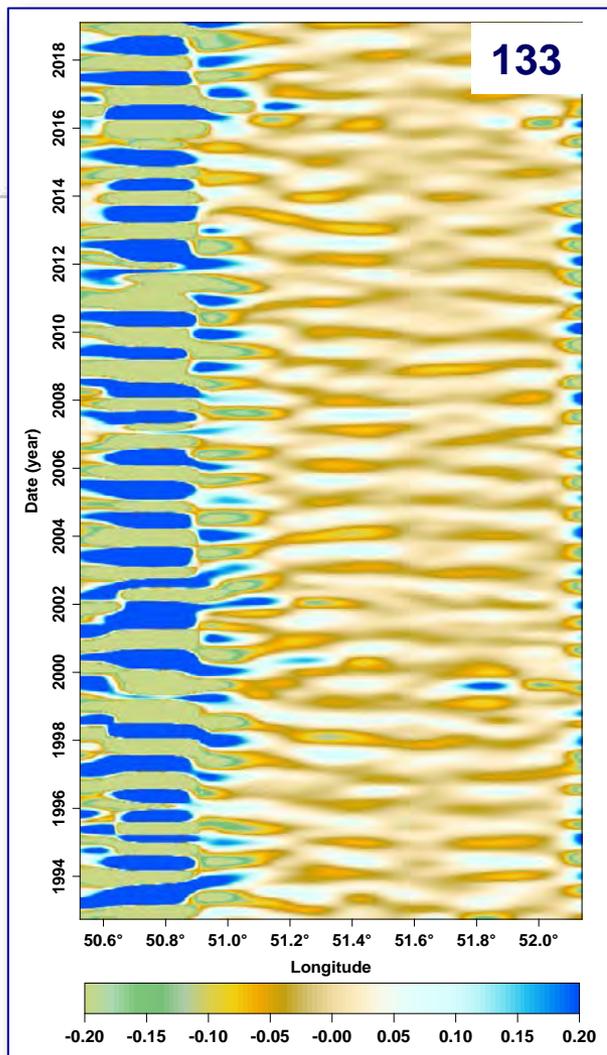
$$u_y \Big|_{z=0} = \frac{g}{f} \frac{\partial h_{dyn}}{\partial x}$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести,  
 $f$  – параметр Кориолиса,  
 $h_{dyn}$  – динамическая топография.

Если повернуть оси координат так, чтобы ось ординат совпала с направлением вдоль 133 и 209 треков, то градиент динамической топографии будет соответствовать компоненте скорости поверхностных течений, направленной перпендикулярно через треки.



# Результаты



**Временная изменчивость аномалий поверхностных геострофических скоростей, направленных по нормали к 133 и 209 трекам.**

**Положительные значения соответствуют юго-восточному направлению течений, отрицательные - северо-западному.**



# Методика

Составляющая водообмена через трек рассчитывается следующим образом:

$$U_y = \int_{x_0}^{x_n} \int_0^H u_y dz dx$$

где  $x_0$  – ордината начал трека,  $x_n$  – ордината конца трека,  $H$  – глубина моря вдоль трека. При этом  $x_n - x_0 = L$  – длина трека.

На поверхности ( $z = 0$ ) скорость определяется из геострофического соотношения, на дне ( $z = H$ ) – из условия прилипания  $u_y = 0$ .

Для того чтобы рассчитать водообмен через трек необходимо знать нормальную к нему составляющую скорости по всей глубине. Однако, если динамическую топографию разложить как

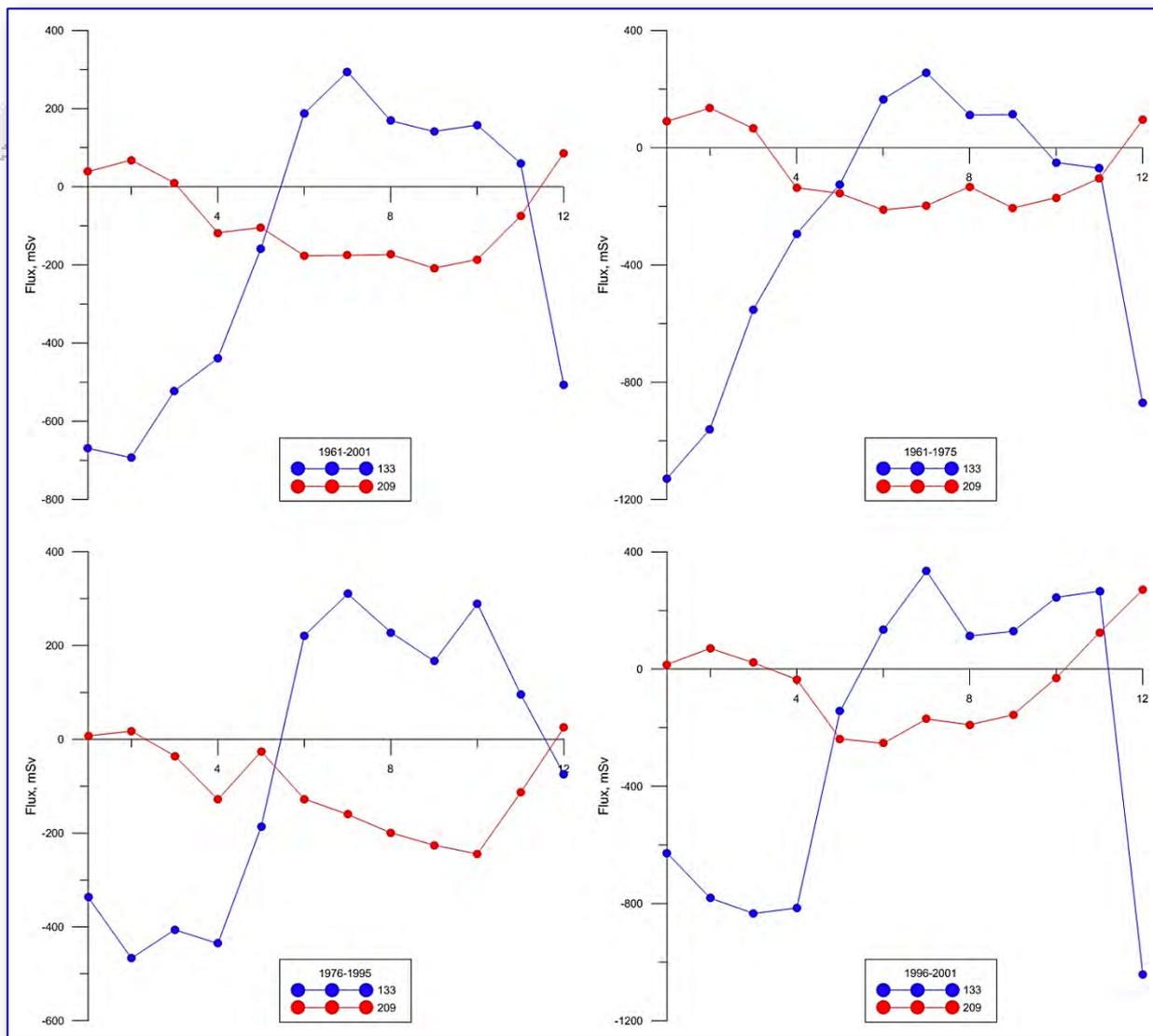
$$h_{dyn} = \overline{h_{dyn}} + \Delta h_{dyn}$$

где  $\overline{h_{dyn}}$  – среднеклиматическая динамическая топография, а  $\Delta h_{dyn}$  – аномалия динамической топографии. Аналогично можно разделить составляющую водообмена через трек на на среднеклиматическую составляющую ( $\overline{U_y}$ ) и аномалию ( $\Delta U_y$ ).

$$U_y = \overline{U_y} + \Delta U_y$$



# Среднегодовое водообмен



Среднегодовое водообмен (мСв) через 133 и 209 треки, рассчитанные для разных интервалов лет, рассчитанный по модели SZ-COMPAS (ИВМ РАН – Р. Ибраев) с разрешение 4,3 км. Положительные значения соответствуют потоку на север.



# Методика

Среднеклиматическая составляющая ( $\overline{U}_y$ ) и аномалия ( $\Delta U_y$ ) водообмена рассчитываются следующим образом:

$$\overline{U}_y = \int_{x_0}^{x_n} \int_0^H \overline{u}_y dz dx, \quad \Delta U_y = \int_{x_0}^{x_n} \int_0^H \Delta u_y dz dx$$

где  $\overline{u}_y$  – среднеклиматические скорости, а  $\Delta u_y$  – аномалии скоростей. На поверхности аномалия скоростей рассчитывается через аномалии динамической топографии

$$\Delta u_y \Big|_{z=0} = \frac{g}{f} \frac{\partial \Delta h_{dyn}}{\partial x}$$

Предполагая, что на дне выполняется условие прилипания  $\Delta u_y = 0$ , а зависимость аномалий скоростей от глубины носит линейный характер

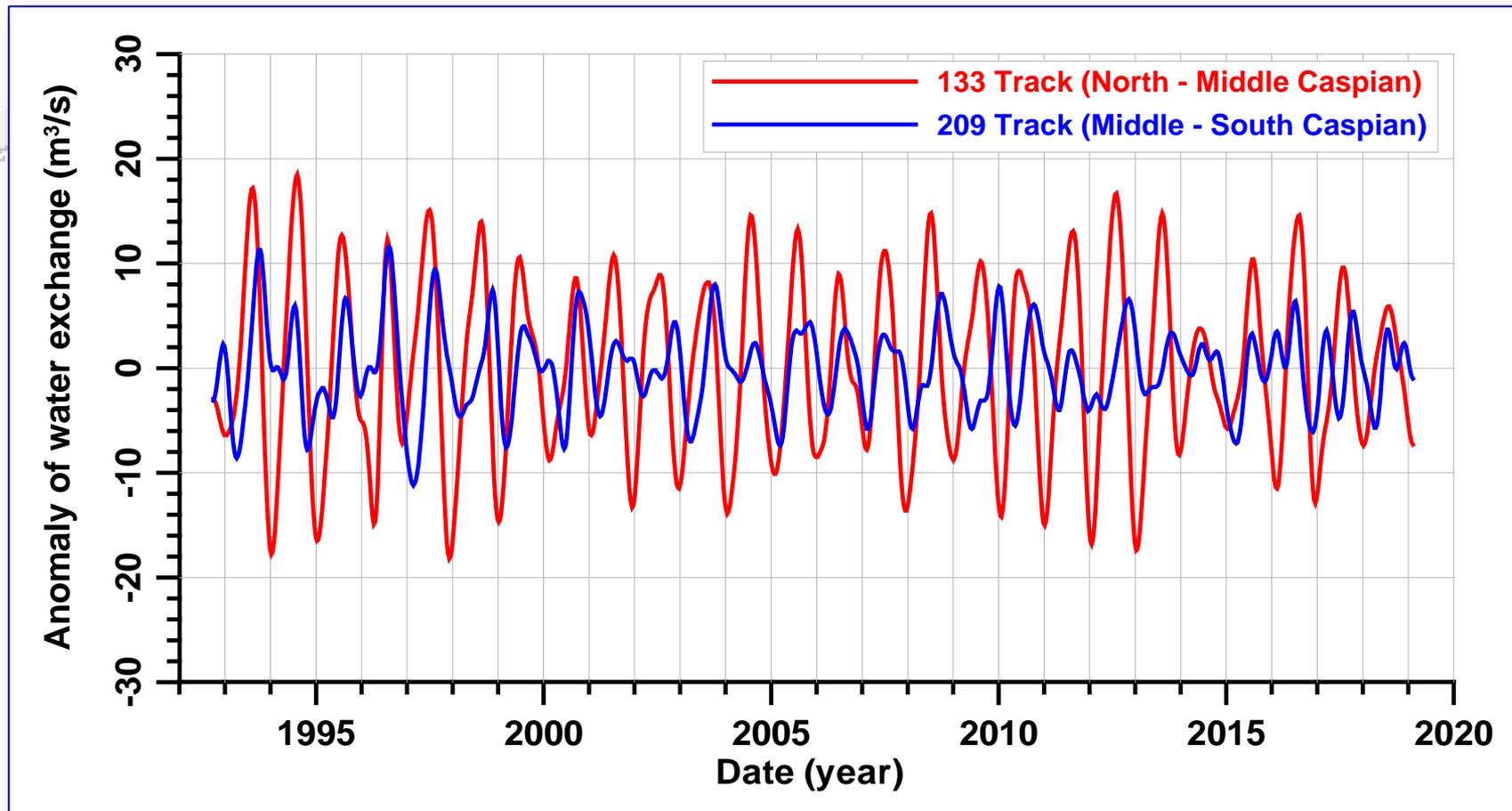
$$\Delta u_y = \frac{g}{f} \frac{\partial \Delta h_{dyn}}{\partial x} \left( 1 - \frac{z}{H} \right)$$

то для аномалии водообмена справедливо выражение:

$$\Delta U_y = \frac{g}{f} \int_{x_0}^{x_n} \frac{\partial \Delta h_{dyn}}{\partial x} \int_0^H \left( 1 - \frac{z}{H} \right) dz dx$$



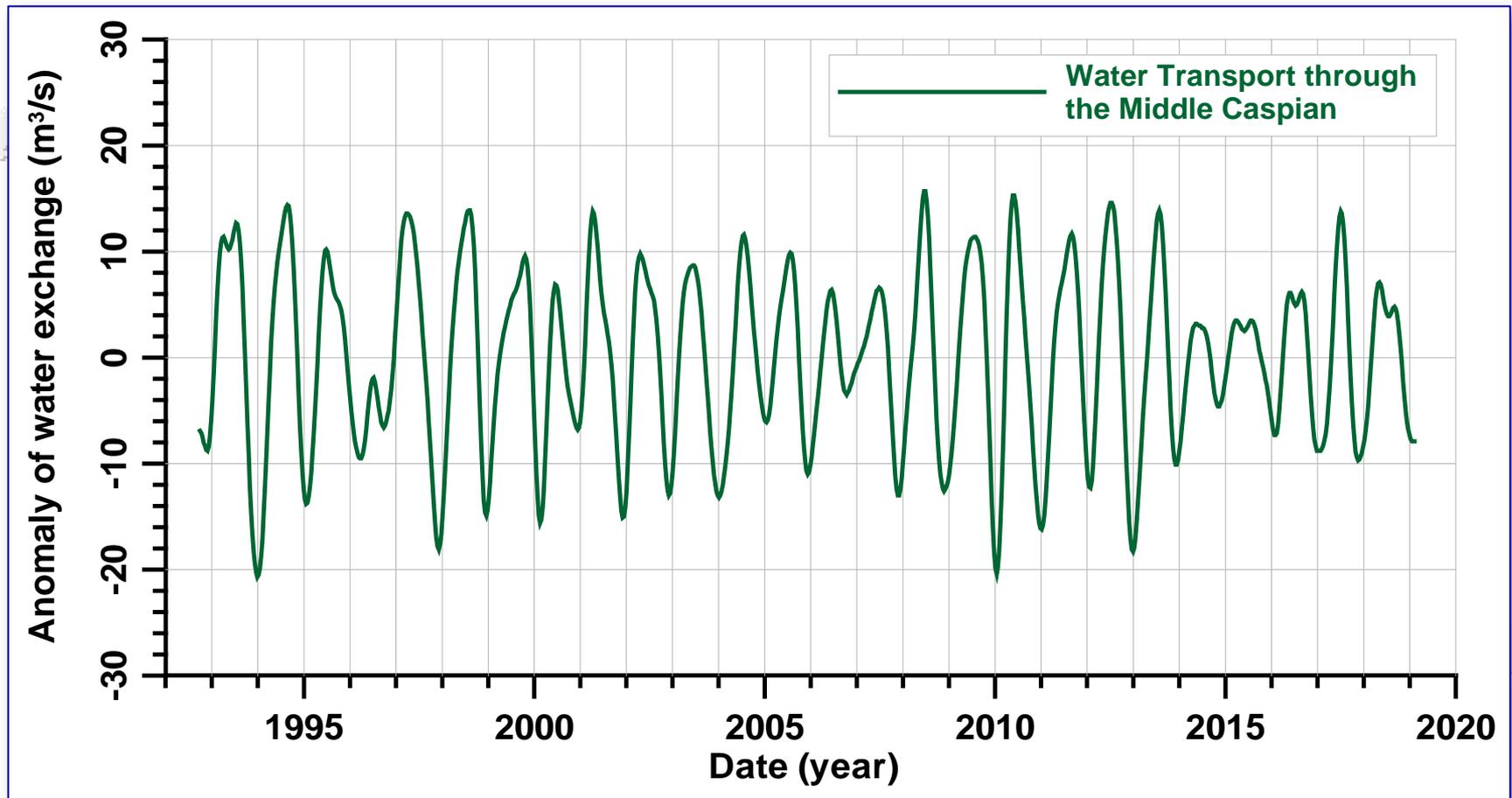
# Результаты



**Временная изменчивость аномалий водообмена между Северным и Средним Каспием по 133 треку и между Средним и Южным Каспием по 209 треку**



# Результаты



**Временная изменчивость аномалий транзита  
воды через Средний Каспий**



# Заключение

- Основной водообмен, связанный со стоком реки Волги, сосредоточен вдоль западного побережья Каспийского моря. В этой области аномалии геострофических скоростей превышают 20 см/с.
- Общие аномалии водообмена через 133 и 209 треки показывают сезонную изменчивость с амплитудой до  $\pm 18 \cdot 10^5$  м<sup>3</sup>/с через 133 трек (линия между Северным и Средним Каспием) и  $\pm 11 \cdot 10^5$  м<sup>3</sup>/с через 209 трек (линия между Средним и Южным Каспием).
- Максимальные значения аномалий водообмена наблюдались в 1993, 1994 и 2012 годах через 133 трек ( $\pm 16 \div 18 \cdot 10^5$  м<sup>3</sup>/с) и в 1993, 1996 и 1997 годах ( $\pm 11 \cdot 10^5$  м<sup>3</sup>/с) через 209 трек.





**Спасибо за внимание**



Десятая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 9– 12 апреля 2019г.

© 2020, С.А. Лебедев, А.Г. Костяной

