



Численное моделирование цунами в  
Каспийском море для районов  
Каспийска и Апшеронского  
полуострова

Е.А. Куликов

А.Ю. Медведева

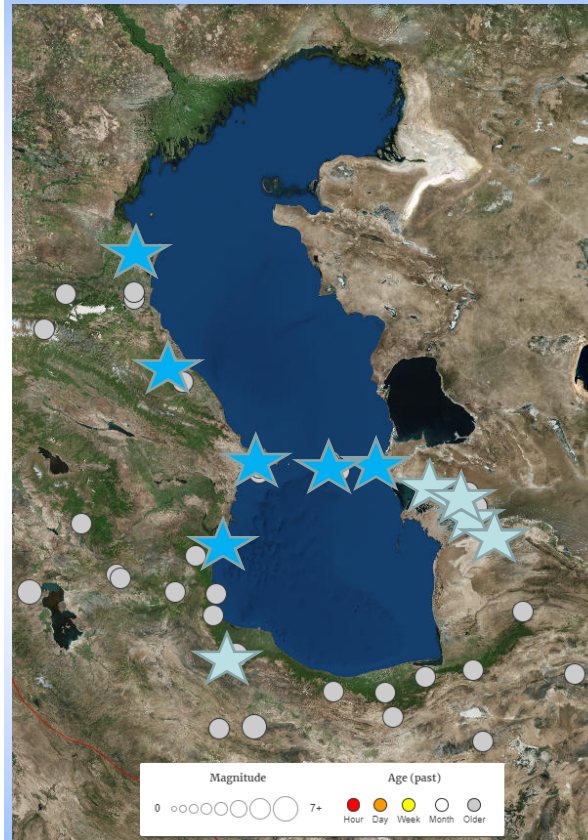
## Содержание:

1. Что мы знаем о цунами в Каспии?
2. Сейсмичность и сейсмический потенциал Каспия
3. Оценка цунамиопасности на основе моделирования «наихудшего сценария».
4. Численное моделирование цунами
5. Примеры «наихудших сценариев» для Каспия

# Исторические события цунами

- Рудбарское 1990 г.  $M = 7.4$
- Краснодарское 1895 г.  
 $M = 8 \pm 0.2$
- Туркменское 2000 г.  $M = 7$
- Казанджикское 1946 г.  $M = 7$
- Большебалханское 2002 г.  $M = 7.2-7.4$
- 743, 918, 957 Дербент
- 1668 Терек
- 1868, 1902, 1960 Баку
- 1876 Чигиль
- 1933 Гувлымаяк
- 1986 Апшеронский порог

В настоящее время имеются упоминания о 14-ти случаях цунами/аномальных колебаний уровня (высота волны не превышала 1-2 м).



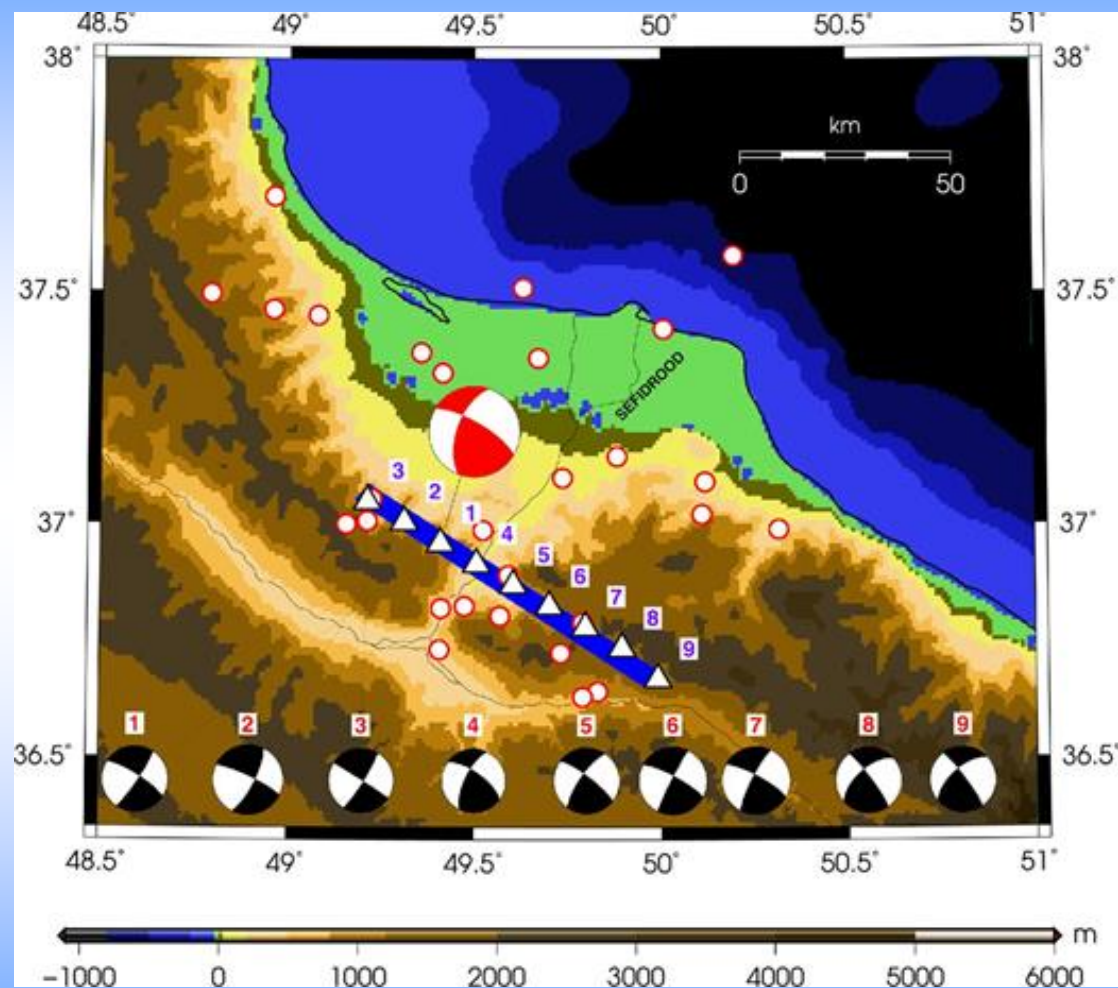
## 8 июля 1895. Землетрясение ( $M_w = 7.9$ ) с эпицентром около г. Красноводска

И. К. Ивановский так описал землетрясение: «В ночь, около 2 часов 30 минут с 26 на 27 июня (старый стиль) когда большая часть населения Узун-Ада уже спала, все моментально проснулись от сильнейшего толчка, который затем несколько раз повторился, и от страшного скрипа и качания деревянных зданий. Проснувшиеся хотели выскочить на улицу, но многие не могли этого сделать, потому что их отбрасывало от дверей, и пришлось вылезать на четвереньках. Те, которые выскочили на улицу, увидели, что вся часть острова Узун-Ада... весьма быстро покрывается водою. Образовалась такая трясина, по которой не было возможности пройти...» С моря хлынули огромные волны и затопили здания и пристани. Многие постройки рухнули, волна снесла в море несколько домов. Воды полностью затопили большой портовый поселок Узун-Ада, где в 1886 году была построена головная станция Закаспийской железной дороги. «С моря хлынули огромные волны и затопили здания и пристани; на улицах образовались трещины до 3 аршинов шириной, откуда ключом била вода. Много зданий разрушено. Несколько домов снесено в море. Заборы разорвались; трубы нефтепроводов тоже».

[Golinskii, 1977; Ivanovskii, 1899].



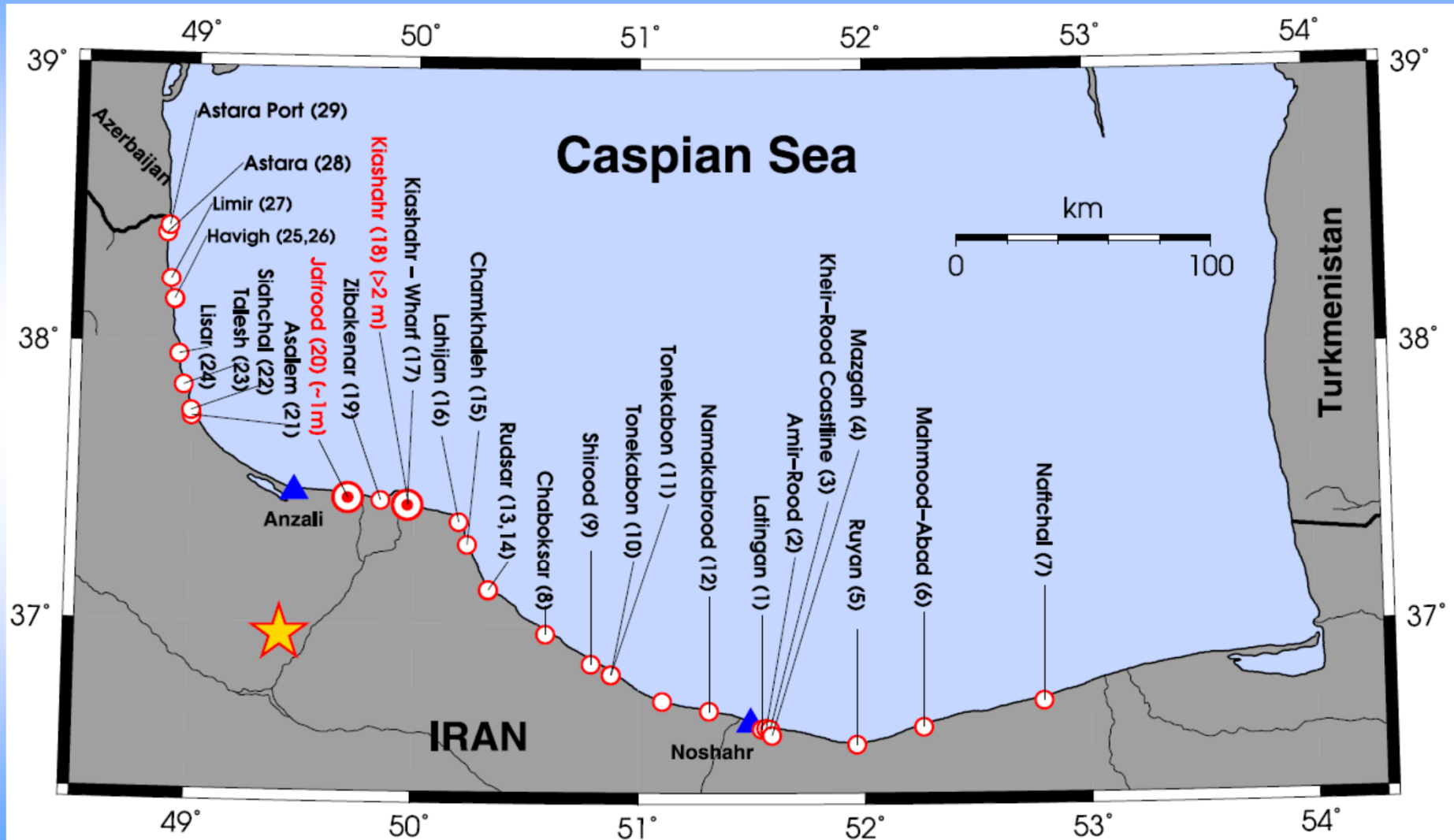
## 20 июня 1990 г. Рудбарское землетрясение ( $M_w = 7.4$ ) и цунами



Из статьи [Amir Salaree & Emile A. Okal, 2015]

# 20 июня 1990 г. Рудбарское цунами

Высота ~ 2 м



Из [Amir Salaree & Emile A. Okal, 2015]

*Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В., Соловьева О.Н.* Цунами в Каспийском море: сейсмические источники и особенности распространения // *Океанология*. 2000. Т. 40. № 4. С. 509–518.

*Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В., Соловьева О.Н.* Общая характеристика цунами в Каспийском море // *Морск. гидрофиз. журн.* 2000. № 3. С. 364–369.

*Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В., Соловьева О.Н.* Цунами в Каспийском море: численное моделирование распространения из зон сейсмической генерации // *Океанология*. 2001. Т. 41. № 3. С. 364–369.

*Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В., Соловьева О.Н.* Цунами в Каспийском море: численное моделирование распространения из зон сейсмической генерации // *Морск. гидрофиз. журн.* 2001. № 6. С. 3–13.

*Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В., Соловьева О.Н.* Особенности проявления цунами от сейсмических источников в Каспийском море // *Изв. РАН, Физика Земли*. 2003. Т. 39. № 4. С. 308–314.

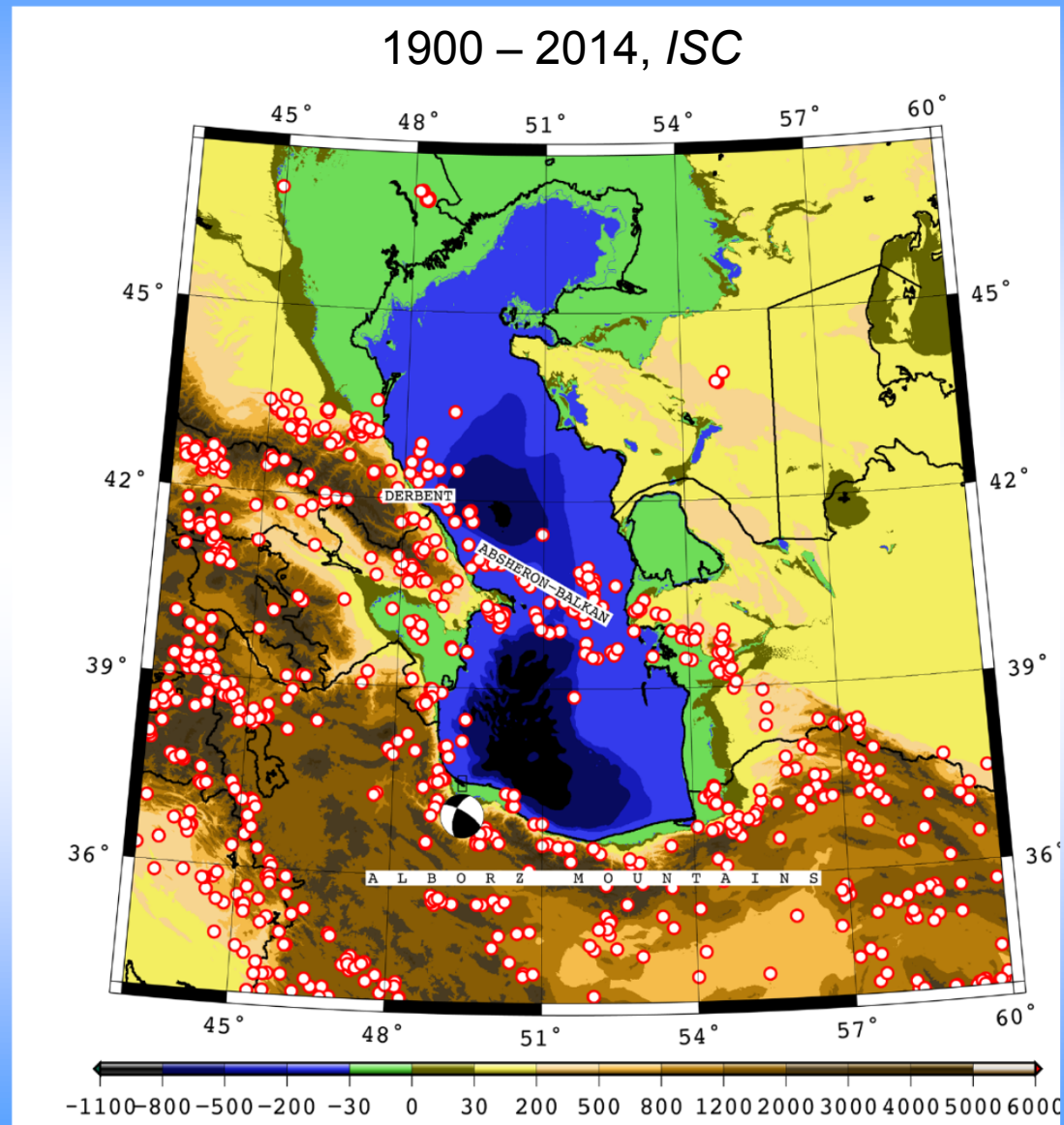
*Никонов А.А.* Бывают ли цунами в Каспийском море? // *Природа*. 1996. № 1. С. 72–73.

*Пелиновский Е.Н.* Предварительные оценки цунамиопасности Каспийского моря. Препринт № 480. ИПФ РАН: Н. Новгород, 1999. 24 с.

Высоты цунами на побережье Северного Каспия с повторяемостью 200, 1000 и 5000 лет [Куликов и др., 2014]

Пункт	Lat	Lon	Высота, м 200 лет	Высота, м 1000 лет	Высота, м 5000 лет
Туркменбаши	40,02	52,97	0,96	3,65	5,00
Актау	43,65	51,15	0,74	2,82	3,85
Форт Шевченко	44,52	50,27	0,48	1,83	2,50
Махачкала	42,98	47,48	1,00	3,80	5,20
Каспийск	42,88	47,63	0,96	3,65	5,00
Избербаш	42,57	47,87	1,10	4,18	5,72
Дербент	42,07	48,30	1,32	5,02	6,87
Сумгаит	40,59	49,64	1,26	4,79	6,56
Баку	40,37	49,84	0,95	3,61	4,94

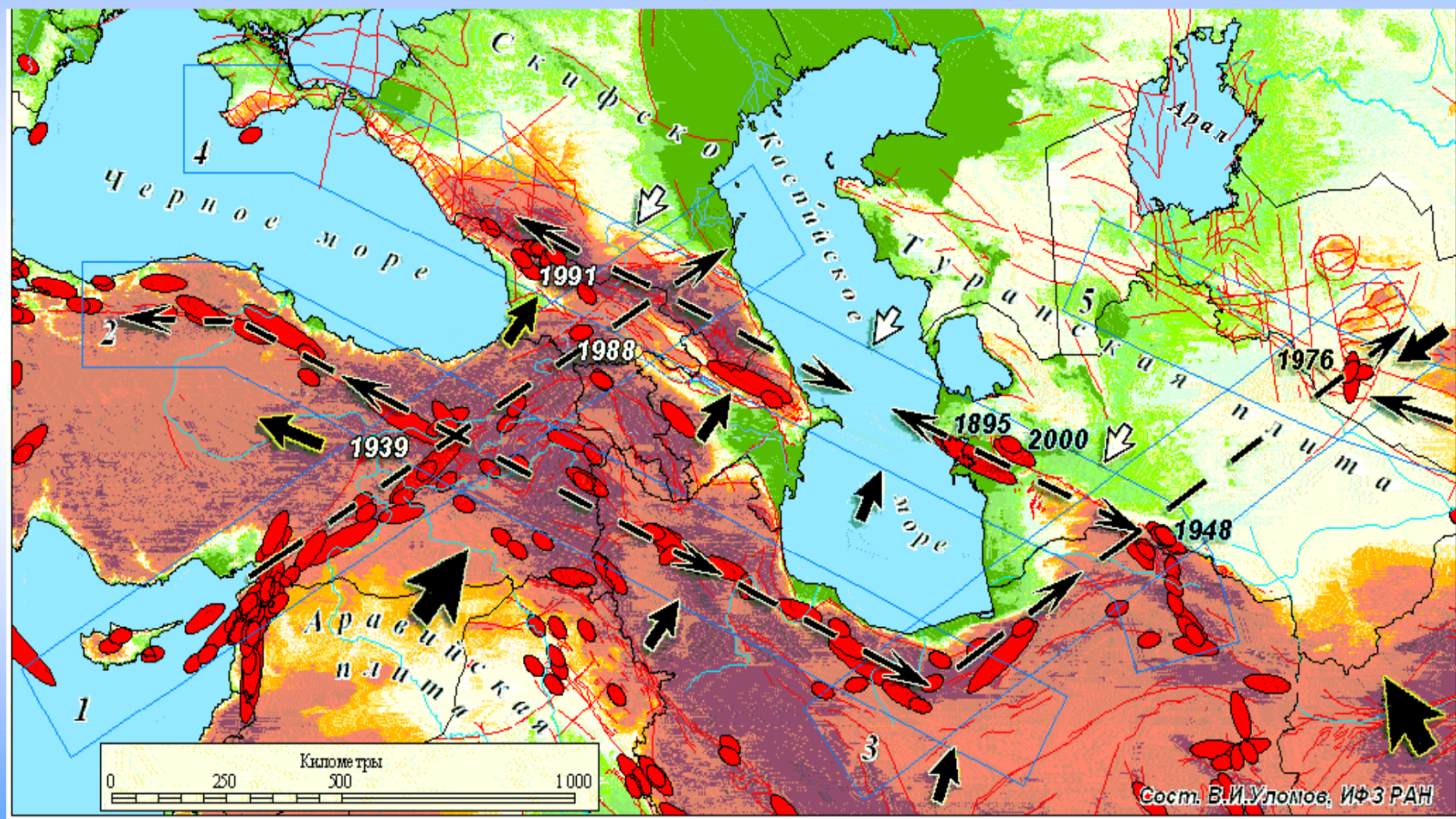
# СЕЙСМИЧНОСТЬ КАСПИЙСКОГО РЕГИОНА



Из [Amir Salaree & Emile A. Okal, 2015]



# Сейсмичность и сейсмодинамика Каспийского региона [Уломов, 2005]



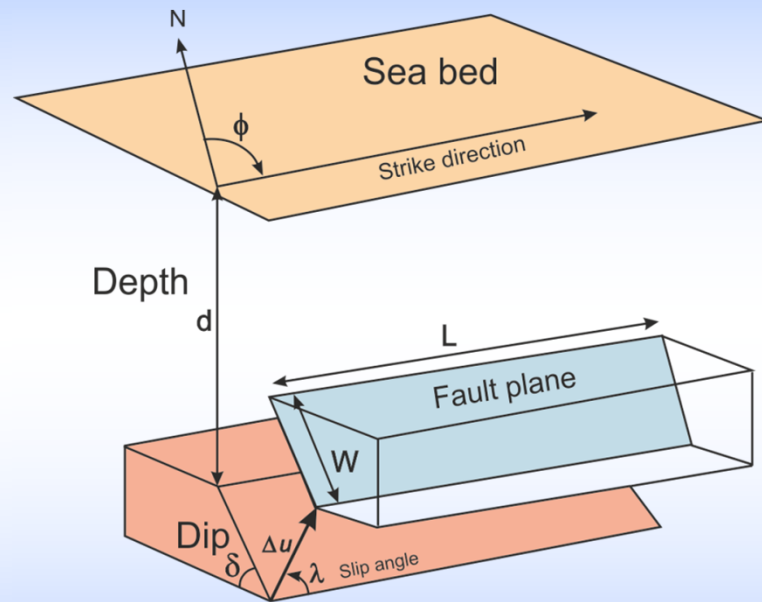
## Сейсмический потенциал Каспийского региона

Магнитуда $M_S$	Период повторяемости $T$ , годы	
	Весь регион	Акватория Каспия
$6.0 \pm 0.2$	2.6	24 (~15)
$6.5 \pm 0.2$	7.8	68 (~30)
$7.0 \pm 0.2$	24 (~15)	195
$7.5 \pm 0.2$	72 (~55)	560
$8.0 \pm 0.2$	216 (~330)	1620
$8.5 \pm 0.2$	655	-

Из [Ulomov, 2001]:  $\lg N_c = 4.135 - 0.918 M_S$ . В скобках указано наблюдаемое количество землетрясений



## Dislocation model



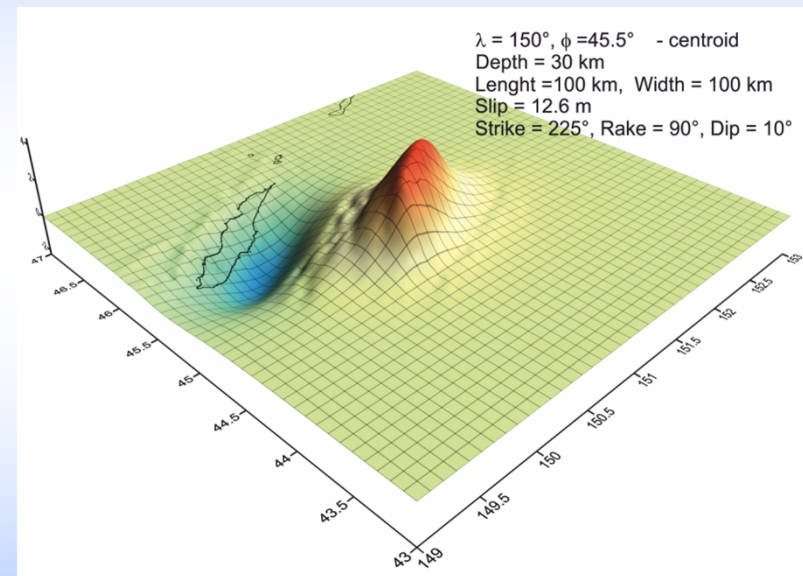
$$M_0 = \mu L W D$$

Seismic moment ( $M_0$ )  
 $\mu$  – shear modulus

## Tsunami source model

Coseismic sea bed deformation

[Okada, 1985]



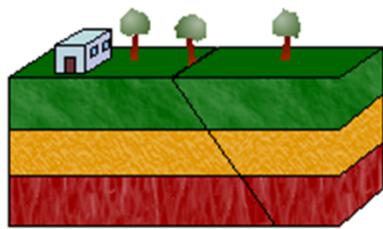
## Regressions of rupture parameters with magnitude $M_w$

[Wells & Coppersmith, 1994]

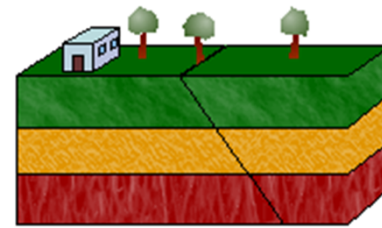
$lgL = 0.59 M_w - 2.44 \pm 0.16,$	$(L, km)$	fault length
$lgW = 0.32 M_w - 1.01 \pm 0.15,$	$(W, km)$	fault width
$lgS = 0.91 M_w - 3.49 \pm 0.24,$	$(S, km^2)$	rupture area
$lg\Delta u_{av} = 0.69 M_w - 4.80 \pm 0.36,$	$(\Delta u_{av}, m)$	average slip
$lg\Delta u_{max} = 0.82 M_w - 5.46 \pm 0.42,$	$(\Delta u_{max}, m)$	maximum slip

# Типы сейсмических разрывов

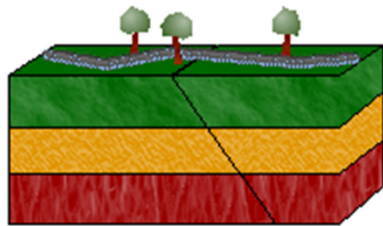
Сброс



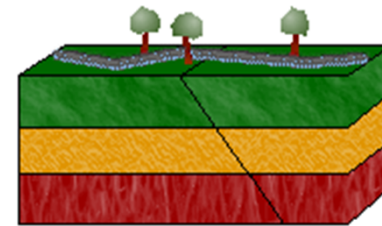
Взброс



Сдвиговый



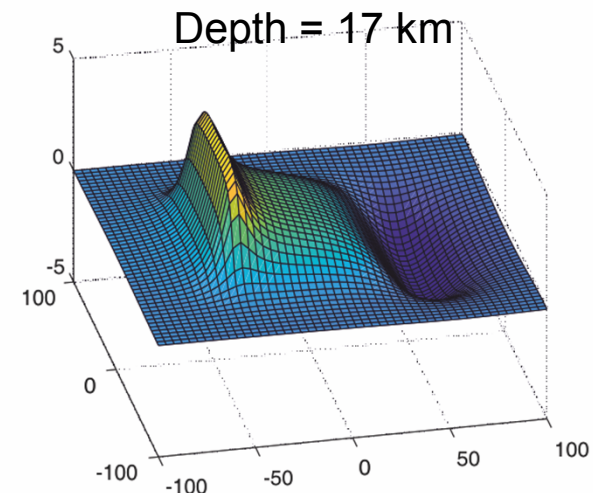
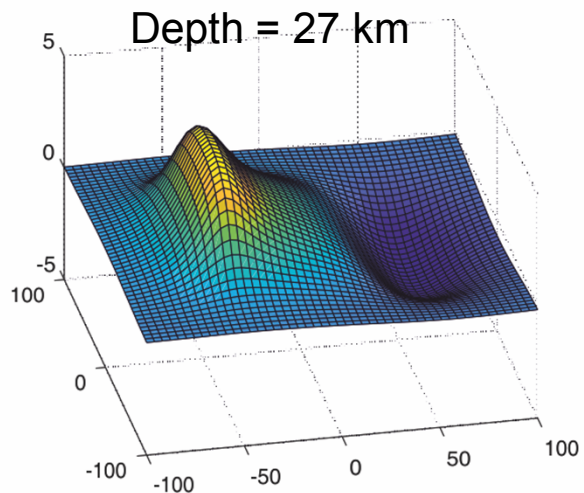
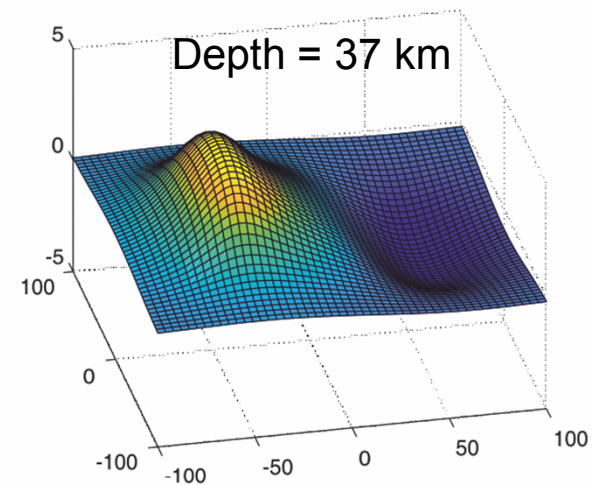
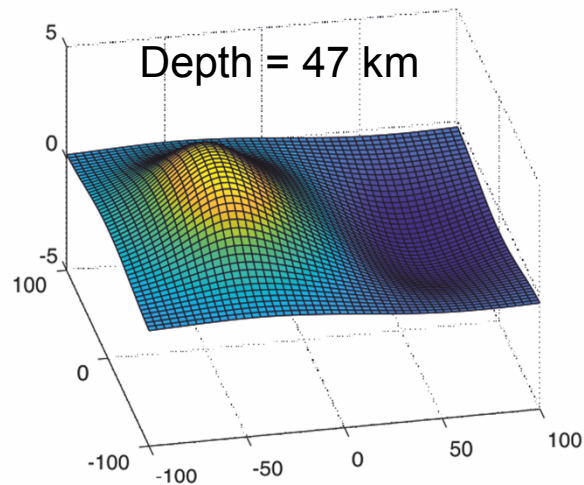
Сбросо-сдвиговый



# Seabed deformation caused by plane fault

How seabed deformation changes with source depth

DIP=10; LENGTH=100; WIDTH=100; RAKE=90; SLIP=12.6;



## Наихудший сценарий

1. Тип разрыва – сброс/взброс
2. Крутой угол падения (близко к  $90^\circ$ )
3. Мелкофокусный источник
4. Источник расположен на глубокой воде
5. Фокусировка излучения волн цунами

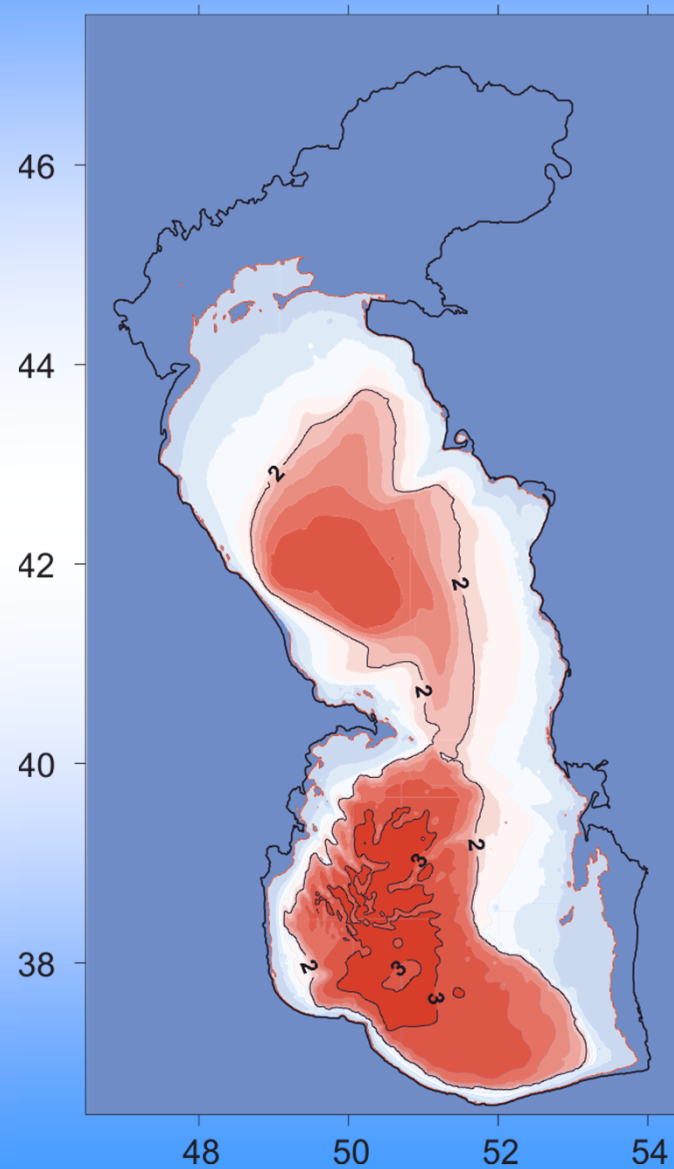
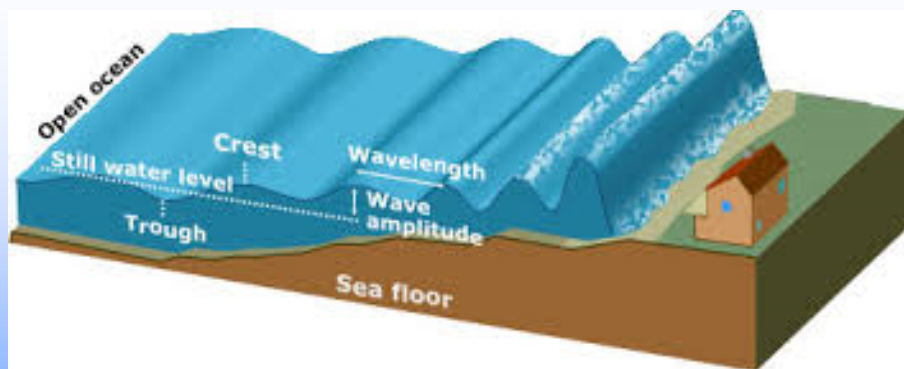
...  
и др.

*We consider worst-case scenarios, where the size of the earthquake is not limited by the largest known event, but merely by the dimension of the basin over which a coherent fault may propagate. While such scenarios are arguably improbable, they may not be impossible, and as such must be examined [Okal et al., 2010]*

# Эффективность генерации цунами

Green law

$$A \sim h^{-1/4}$$



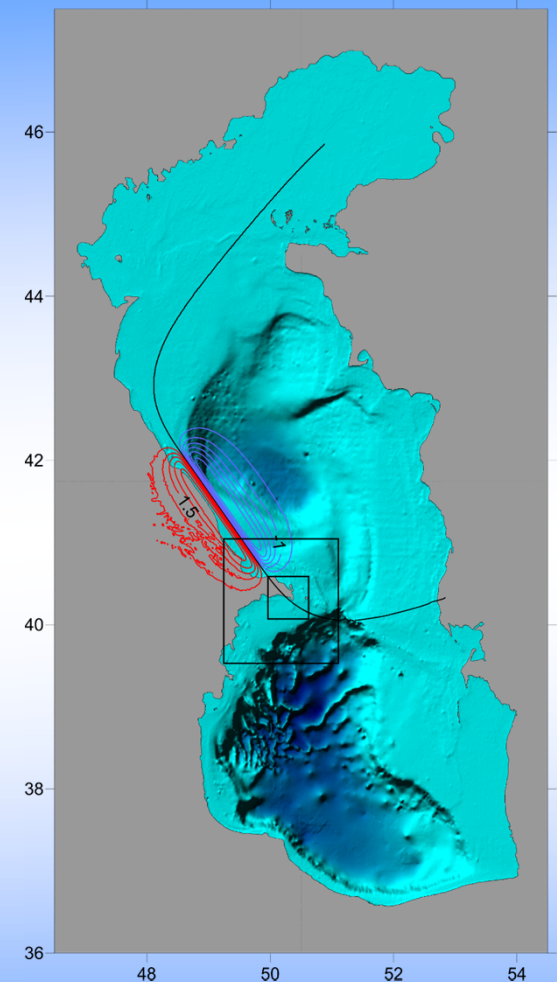
# Численное моделирование цунами

Использовалась разновидность модели TUNAMI [Imamura, 1996], где реализована конечно-разностная аппроксимация уравнений мелкой воды в сферической системе координат

Топография морского дна задавалась с разрешением 30" по данным GEBCO.

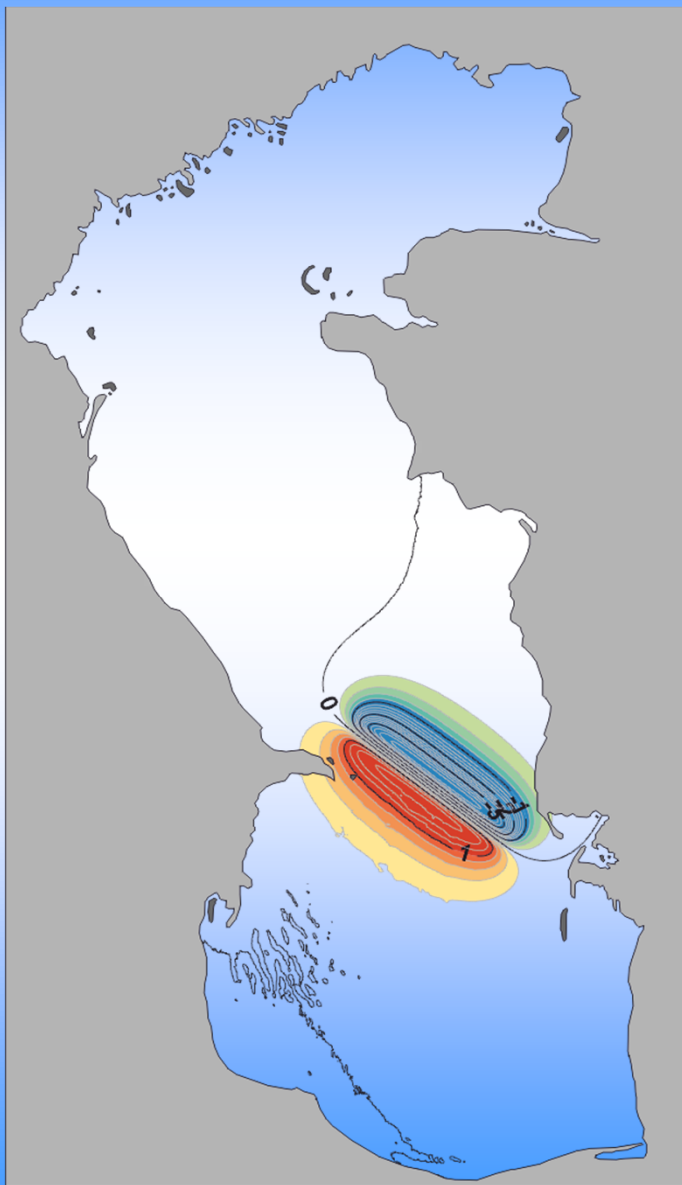
Для расчета наката волны на сухой берег использовались сглаженные данные NASA SRTM3 с разрешением 1" (Shuttle Radar Topographic mission).

В численной модели использовалась технология вложенных сеток [Fine et. al., 2018]: первая основная сетка охватывает все море с горизонтальным разрешением 30 угловых сек., вторая, промежуточная, с шагом 6 секунд и, наконец, сетка для расчета наката волны на берег с разрешением 1 угловая секунда ("), что составляет приблизительно 30 м. При генерации сеток батиметрии с разрешением 1" и 6" оцифровывались данные с навигационных карт 1:50000.

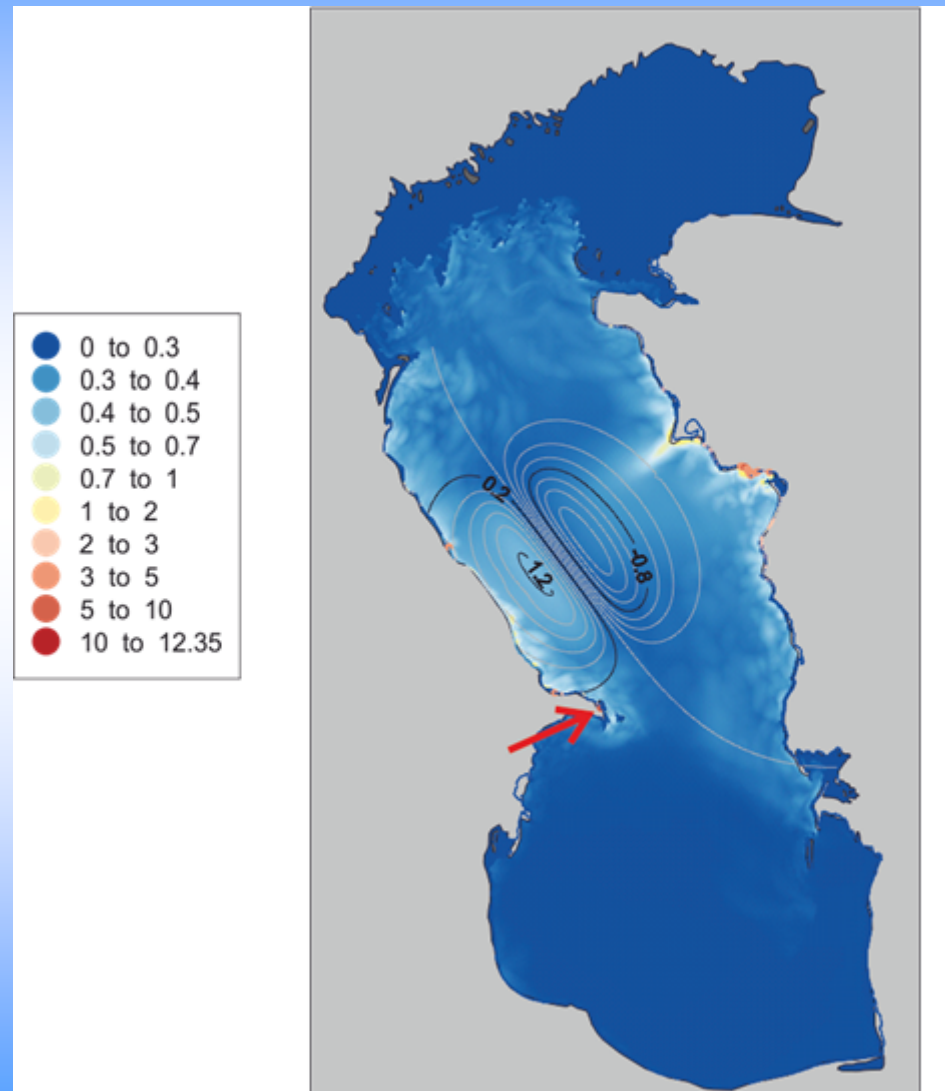




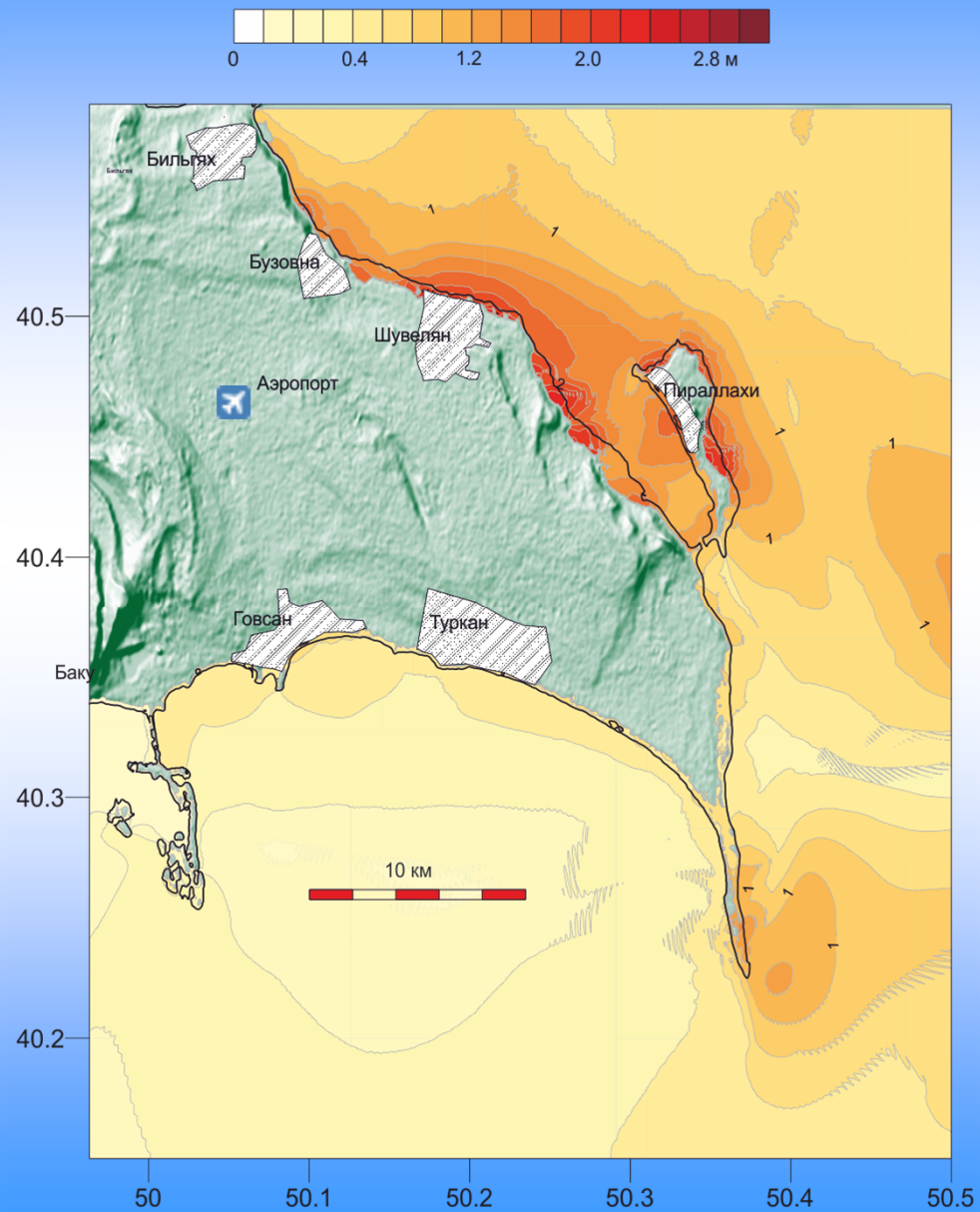
# Численное моделирование распространения цунами



## Наихудший сценарий для северной части Апшеронского п-ва

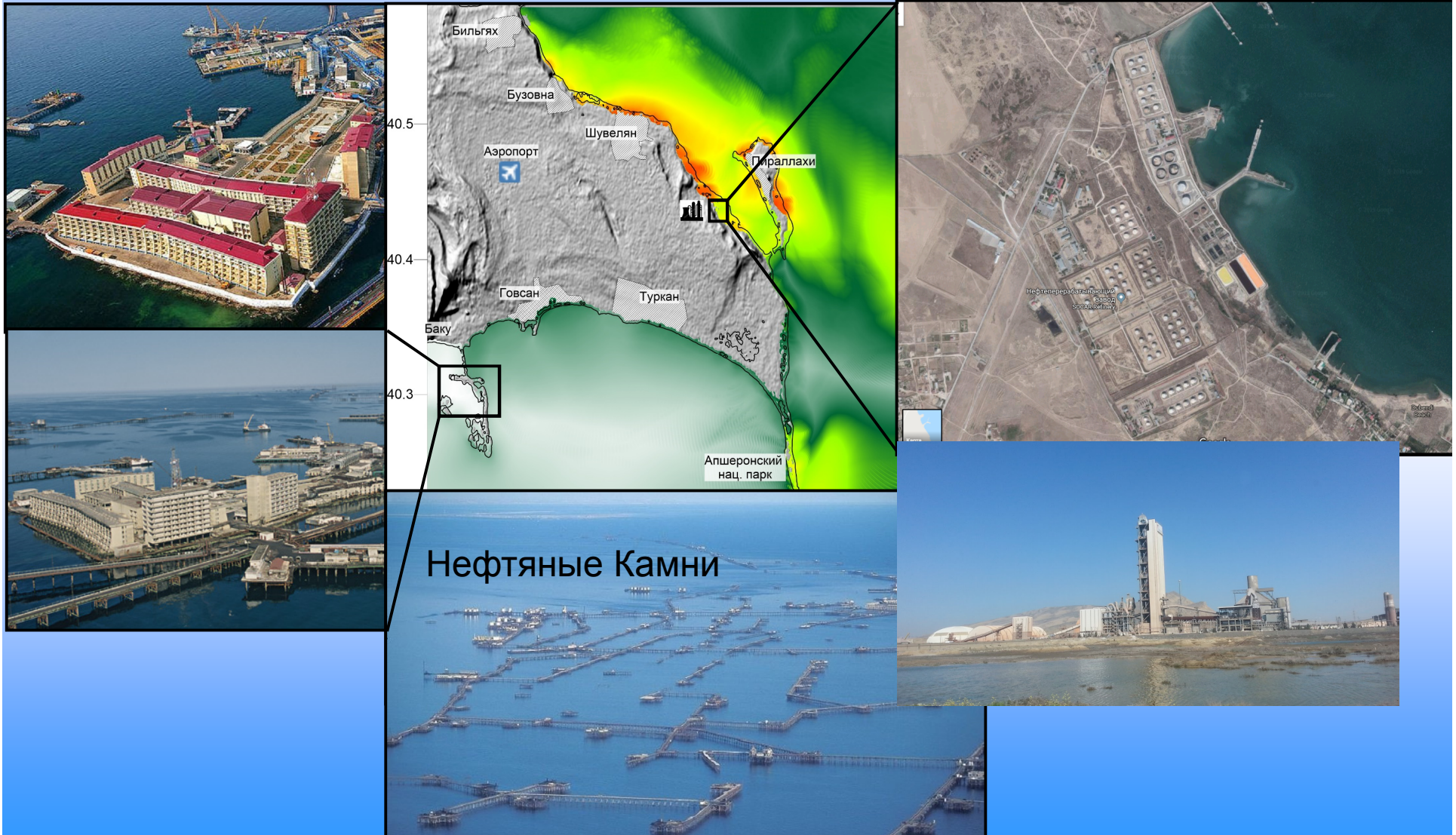


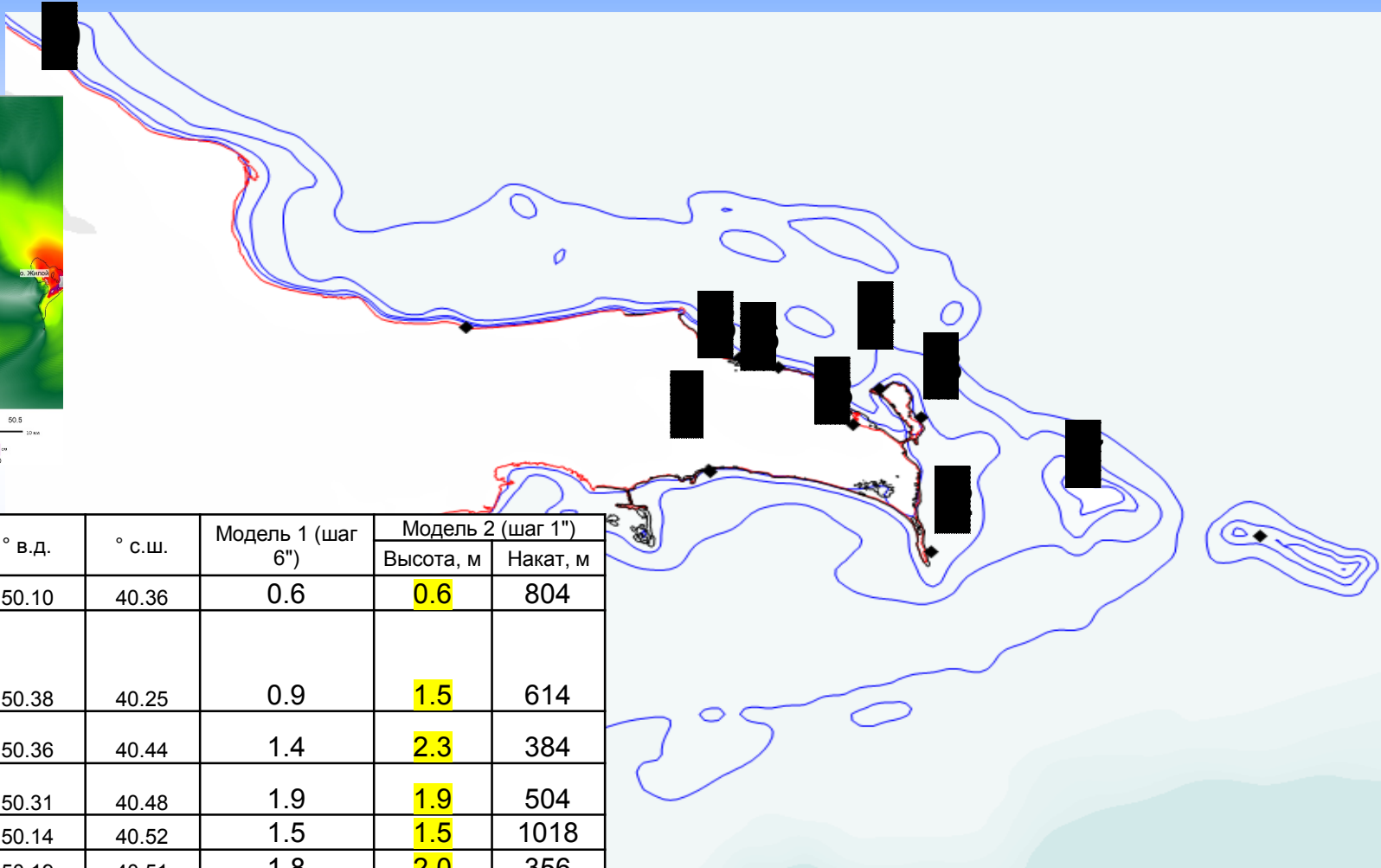
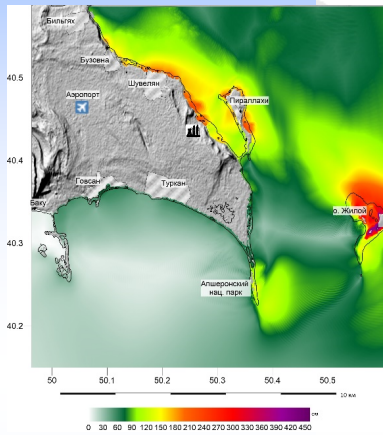
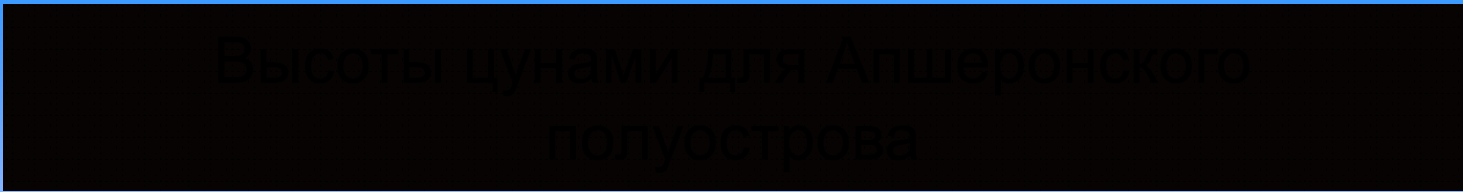
# Результаты расчета высоты волн цунами в районе Апшеронского п-ва





# Результаты расчета

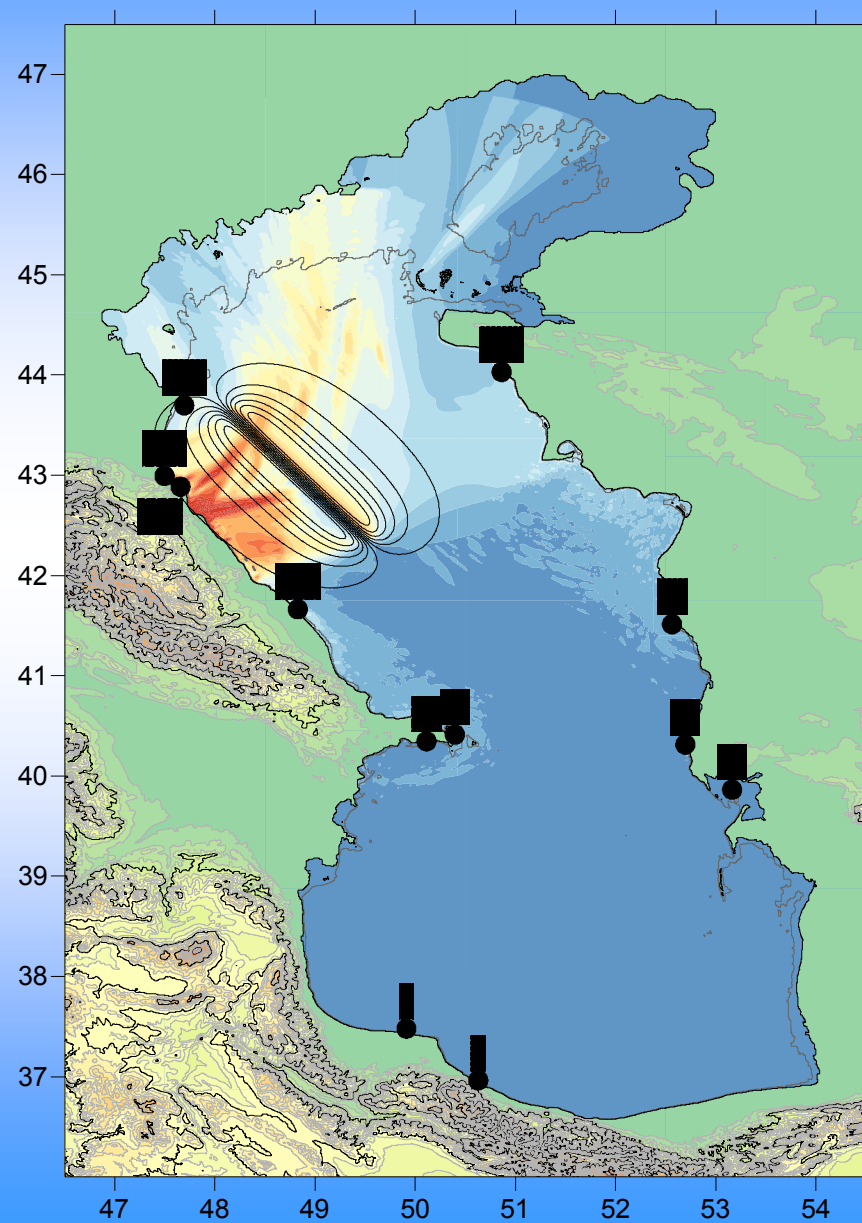
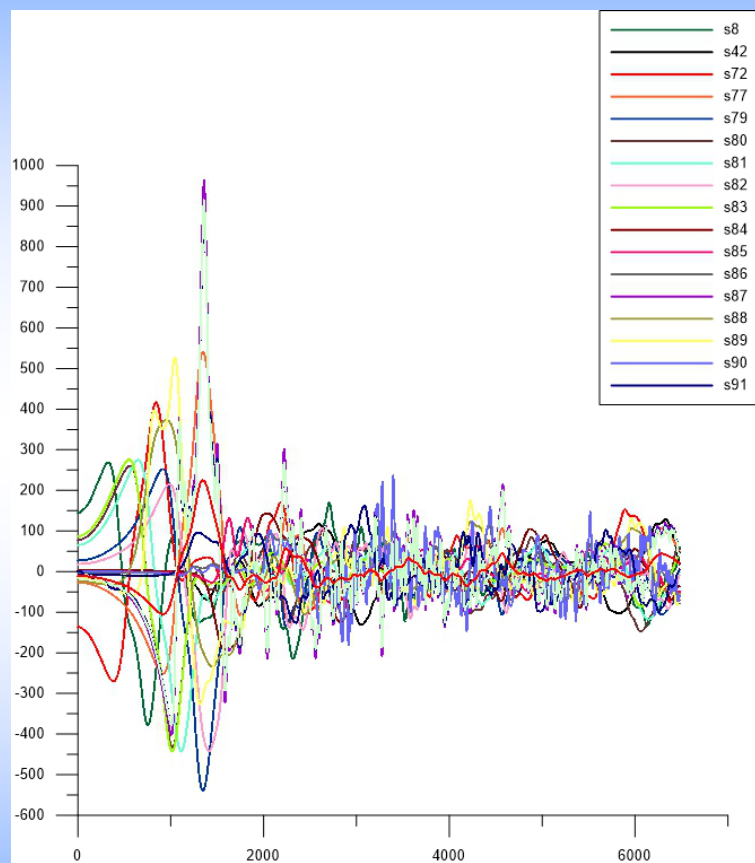




№	Название	° в.д.	° с.ш.	Модель 1 (шаг 6")	Модель 2 (шаг 1")	
					Высота, м	Накат, м
1	Говсан	50.10	40.36	0.6	0.6	804
2	мыс (Апшеронский нац. парк)	50.38	40.25	0.9	1.5	614
3	Пираллахи (восток)	50.36	40.44	1.4	2.3	384
4	Пираллахи (север)	50.31	40.48	1.9	1.9	504
5	Бузовна	50.14	40.52	1.5	1.5	1018
6	Шувелян	50.19	40.51	1.8	2.0	356
7	о. Жилой	50.57	40.35	3.8	3.1	3033
8	Нефтезавод	50.26	40.47	2.0	2.4	1474
9	Новханы	49.80	40.57	1.8	2.1	186



# Наихудший сценарий для г. Каспийск





СПАСИБО



## Приближение мелкой воды, гидростатика:

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz = u(h + \eta) = uD, \quad N = \int_{-h}^{\eta} v dz = v(h + \eta) = vD,$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad - \text{уравнение неразрывности}$$

~~$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho}$$~~

~~$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho}$$~~

$(\tau_x, \tau_y)$  – придонное трение

## Наша модель

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left[ \frac{\partial M}{\partial \lambda} + \frac{\partial (N \cos \phi)}{\partial \phi} \right]$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{gh}{R \cos \phi} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} = \tau_\lambda / \rho \qquad \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{gh}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \phi} = \tau_\phi / \rho$$

$\phi, \lambda$  – текущие широта и долгота,  $R$  – радиус Земли

$$\tau_b = -K_b \rho \cdot \mathbf{U} |\mathbf{U}| / h^2$$

Коэффициент трения  $K_b = 0.0025$

На береговой границе  $G$  – условие непротекания:  $U_n = 0$  на  $G$

На открытой границе условие излучения  $\Gamma$   $U_n = \zeta \sqrt{gh}$

## Придонное трение

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{1}{2g} \frac{f}{D^2} M \sqrt{M^2 + N^2}$$

$$\frac{\tau_y}{\rho} = \frac{1}{2g} \frac{f}{D^2} N \sqrt{M^2 + N^2}$$

$f$  - коэффициент трения

$$n = \sqrt{\frac{fD^{1/3}}{2g}}$$

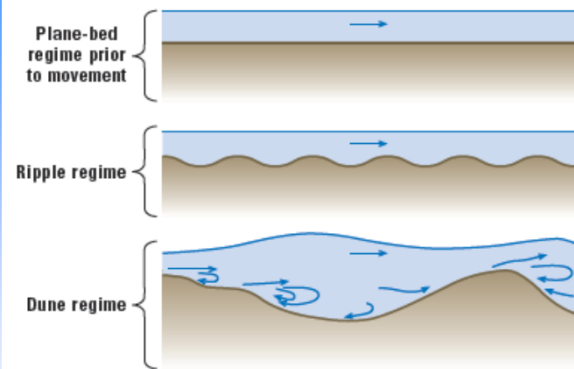
$n$  - коэффициент шероховатости по Маннингу

## Формула Маннинга:

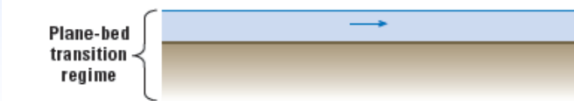
$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{fn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2}$$

$$\frac{\tau_y}{\rho} = \frac{fn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2}$$

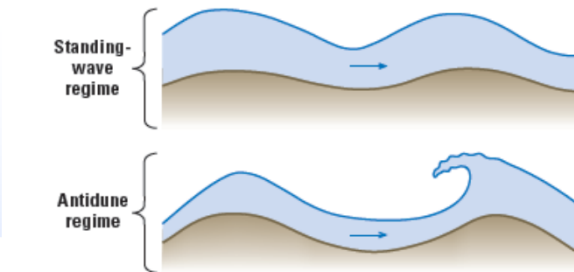
### A. Lower-regime flows



### B. Transition-regime flows



### C. Upper-regime flows



NOTE: Blue arrows denote flow direction

**Table 1.1** Values of Coefficient of Bottom Friction  $n$  (after Linsley and Franzini, 1979)

Channel Material	$n$	Channel Material	$n$
Neat cement, smooth metal	0.010	Natural channels in good condition	0.025
Rubble masonry	0.017	Natural channels with stones and weeds	0.035
Smooth earth	0.018	Very poor natural channels	0.060