



ФГБУН Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук

# **Возможность генерации цунами гипотетическими подводными оползнями вблизи побережья о. Сахалин**

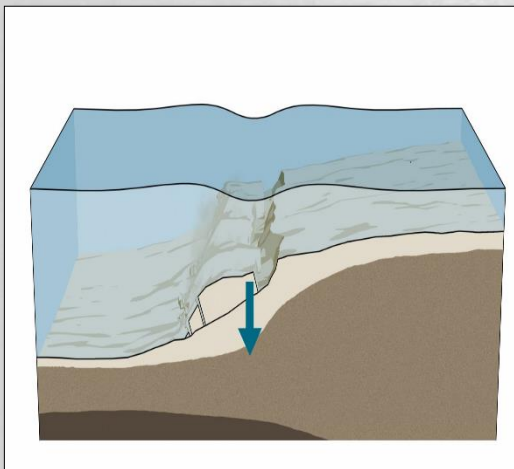
А.И. Зайцев, Е.Н. Пелиновский, И.С. Костенко

## Примеры цунами от подводных оползней

<i>Дата</i>	<i>Событие</i>	<i>Высота цунами</i>	<i>Количество жертв</i>
7300-8000 лет назад Побережье Норвегии	Подводный оползень Сторегга	<p><b>20-25 м</b> над уровнем моря в то время (по отложениям в озерах на северном и восточном побережье Шетландских островов).</p> <p>Высота максимальных волн цунами достигала 10-12 м, на южном побережье Баренцева моря 3-4 м.</p>	
18 ноября 1929 г. Ньюфаундленд	После сильного землетрясения сошел подводный оползень	<b>27 м</b>	28 человек
17.07.1998 г. Северо-западное побережье Папуа- Новая Гвинея	Мощный подводный оползень, который был вызван землетрясением с магнитудой 7,1.	Цунами достигало высоты <b>15 м</b> и затронуло около 20-30 км береговой линии вдоль северного побережья	Более 2000 человек
28.09.2018 г. о. Сулавеси (Индонезия)	Цунами было вызвано как землетрясением магнитудой 7,5, так и сходом оползня.	<b>10,9 м</b>	Более 2000 человек



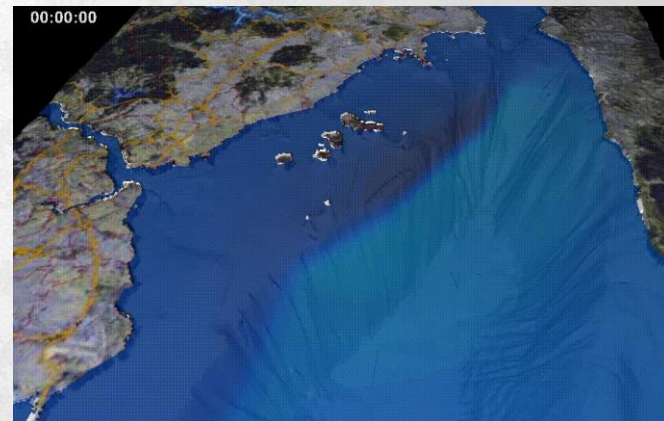
# Распространение поверхностных волн оползневого происхождения



$$\frac{\partial M_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_1^2}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{M_1 N_1}{D_1} \right) + gD_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} + \frac{gm_1^2}{2D_1^{7/3}} M_1 \sqrt{M_1^2 + N_1^2} = 0$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N_1^2}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_1 N_1}{D_1} \right) + gD_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial y} + \frac{gm_1^2}{2D_1^{7/3}} M_1 \sqrt{M_1^2 + N_1^2} = 0$$

$$\frac{\partial(\eta_1 - \eta_2)}{\partial t} + \frac{\partial M_1}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} = 0$$



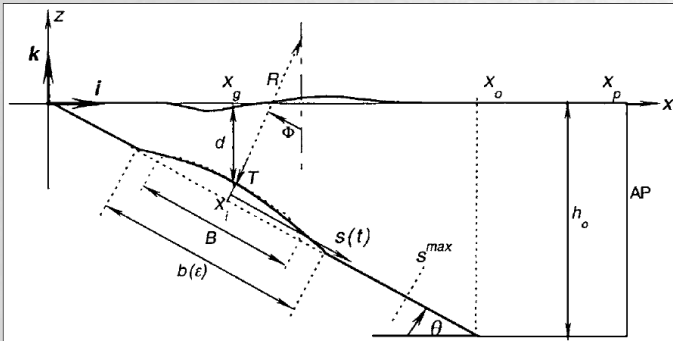
$$\frac{\partial \eta_2}{\partial t} + \frac{\partial M_2}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} - \beta \left( \frac{\partial^2 \eta_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta_2}{\partial y^2} \right) = 0$$

$$\frac{\partial M_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_2^2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{M_2 N_2}{D_2} \right) + gD_2 \left[ \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\partial}{\partial x} (\eta_1 + h_1 - \eta_2) + \frac{\partial}{\partial x} (\eta_2 - h_1) \right] + \frac{gm_2^2}{2D_2^{7/3}} M_2 \sqrt{M_2^2 + N_2^2} = 0,$$

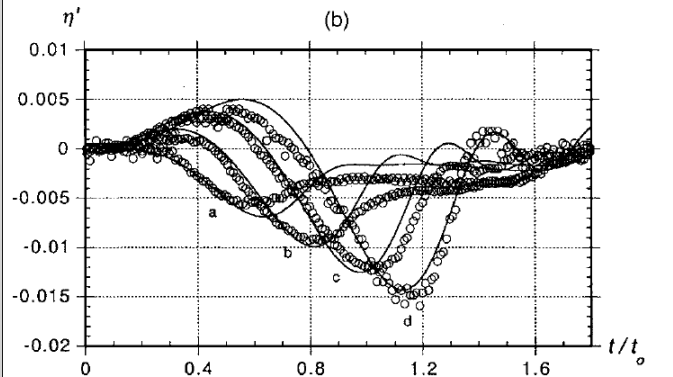
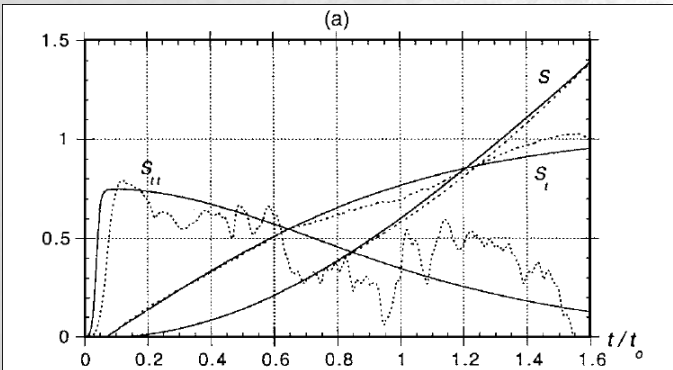
$$\frac{\partial N_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N_2^2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_2 N_2}{D_2} \right) + gD_2 \left[ \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\partial}{\partial y} (\eta_1 + h_1 - \eta_2) + \frac{\partial}{\partial y} (\eta_2 - h_1) \right] + \frac{gm_2^2}{2D_2^{7/3}} N_2 \sqrt{M_2^2 + N_2^2} = 0,$$

# Бенчмарк тестирование. Численное моделирование движения подводного

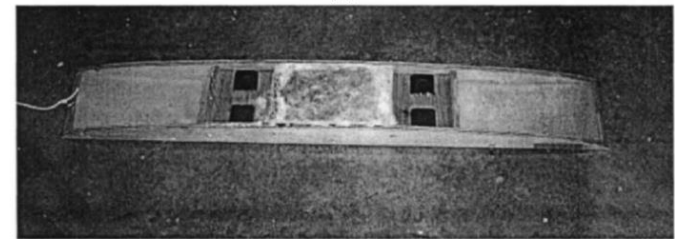
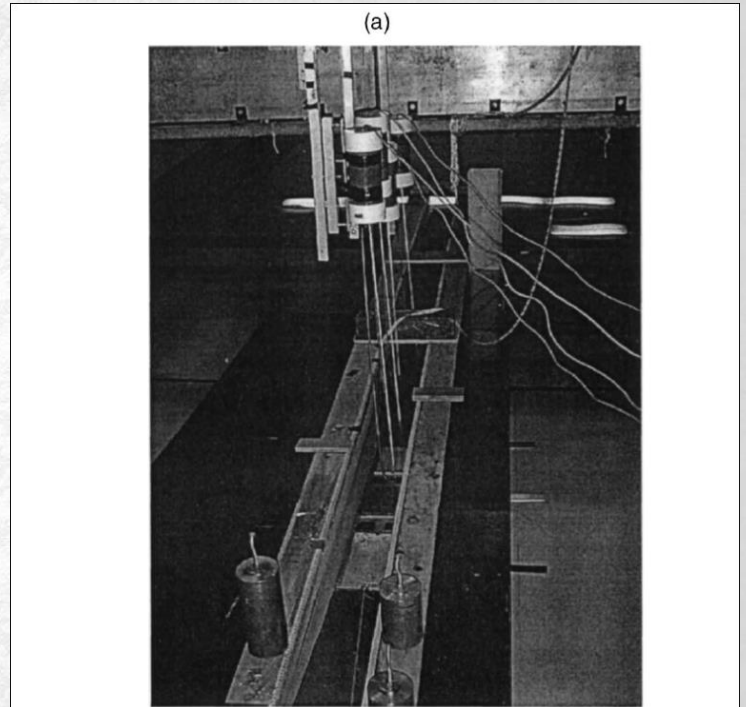
## ОПОЛЗНЯ



Sketch of SMF tsunami problem geometry, main parameters, and setup of computational domain for 2D-FNPF numerical model



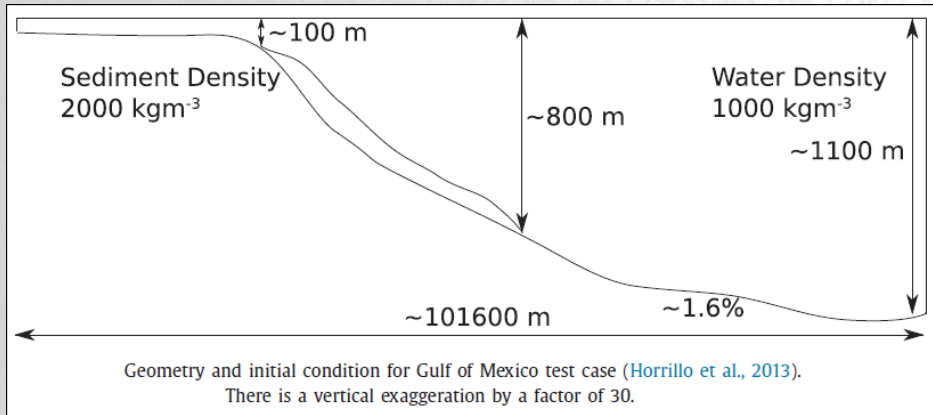
Results of laboratory experiments (○) (---) and simulations (—), for 2D slide experiments of Fig. 5): (a) slide kinematics; and (b) elevation  $\eta'$  at gauges located at  $x'=a:1.175$ ,  $b:1.475$ ,  $c:1.775$ ,  $d:2.075$



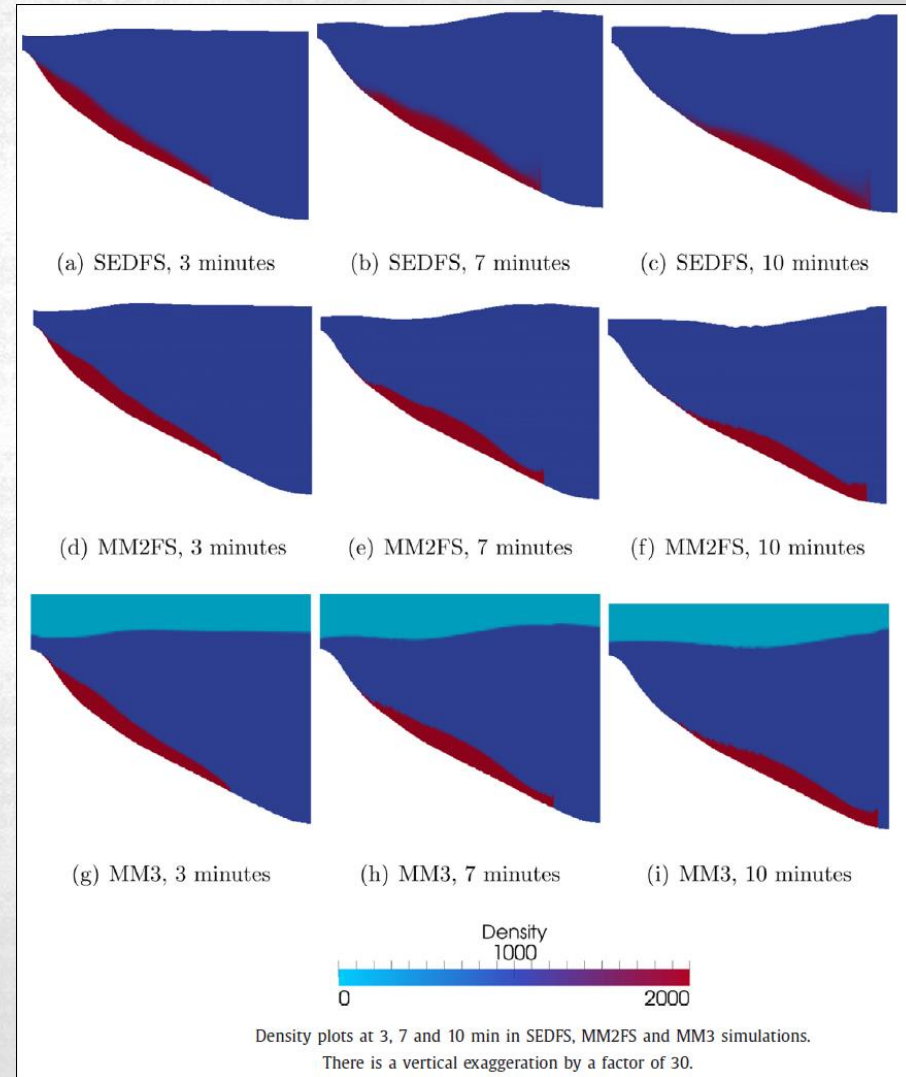
Laboratory experiments for 2D slide over  $\theta=15^\circ$  slope: (a) experimental setup for submergence depth  $d=d_{ref}=0.259$  m, with four capacitance wave gauges; and (b) semielliptical plywood and mylar slide model with  $B=1$  m,  $T=T_{ref}=0.052$  m,  $w=0.2$  m, and lead weight (at center) to achieve  $\gamma=1.806$



# Бенчмарк тестирование. Численное моделирование движения подводного оползня

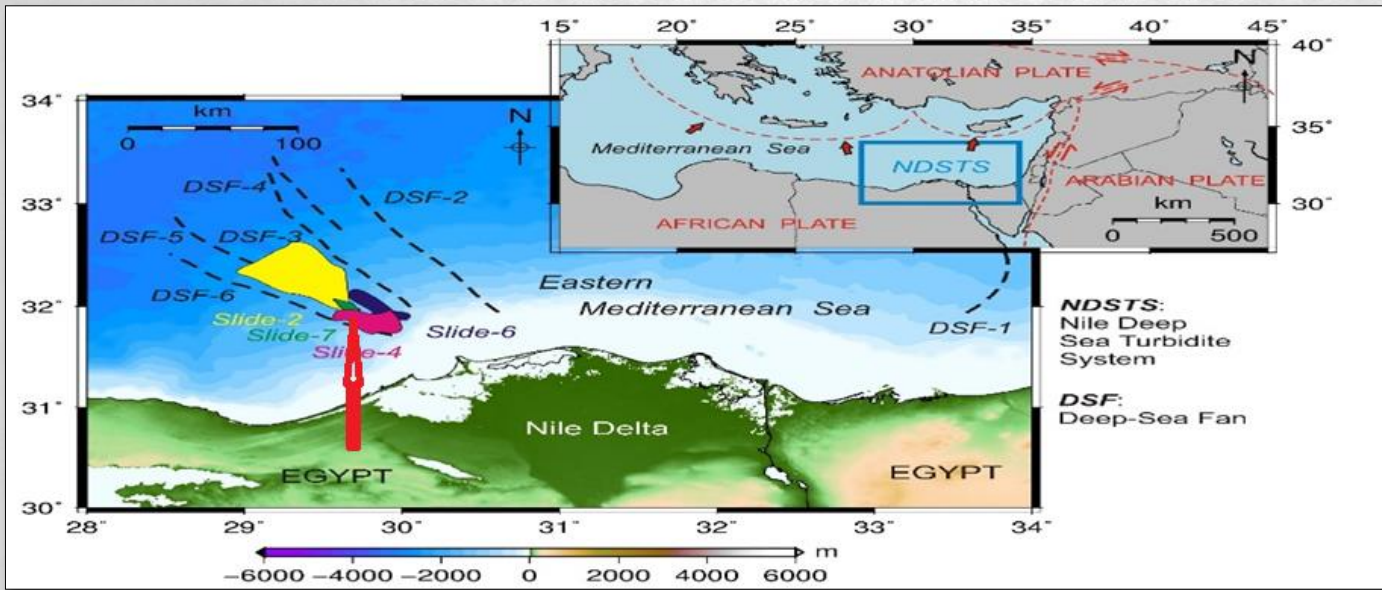


Геометрия и начальное условие для тестового случая в Мексиканском заливе. Существует вертикальное преувеличение в 30 раз.



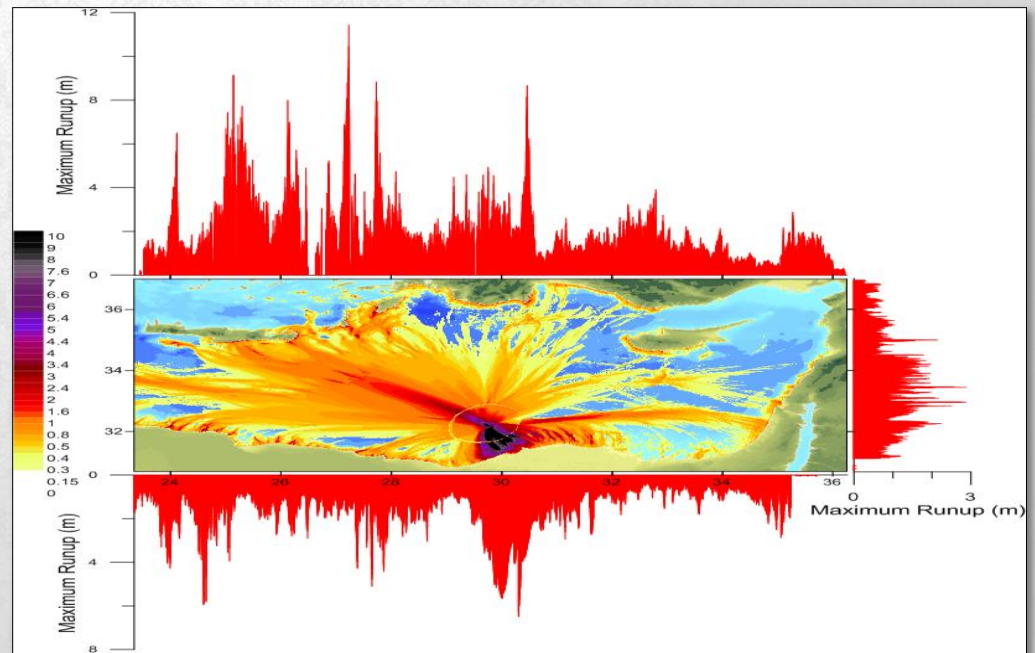
Графики плотности на 3, 7 и 10 мин в моделях SEDFS, MM2 FS и MM3. Существует вертикальное преувеличение в 30 раз.

# Генерация цунами подводным оползнем в дельтах рек



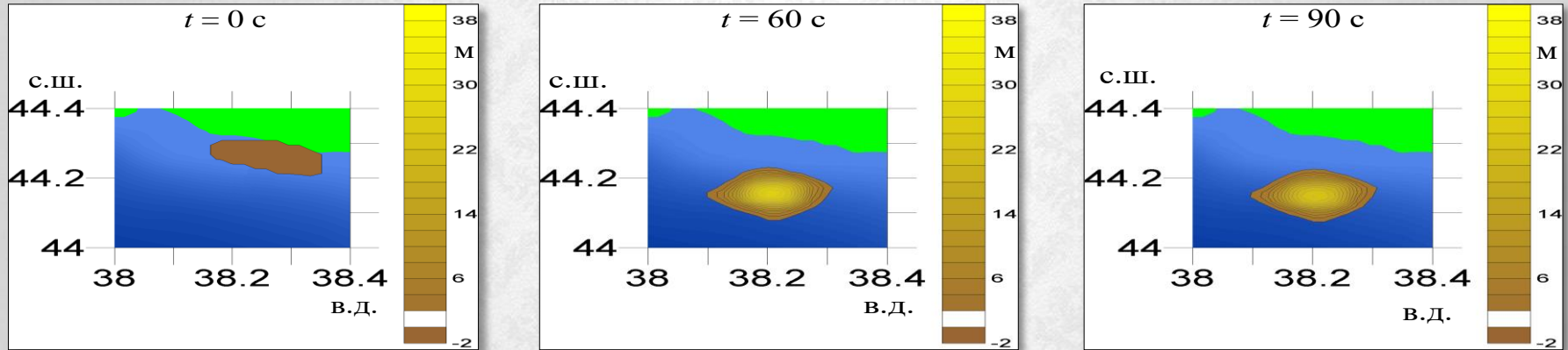
Расположение донных осадков [Garziglia et al. 2008].

Распределение максимальных положительных амплитуд волны в течение всего времени моделирования цунами, а также распределение высот вдоль побережья.

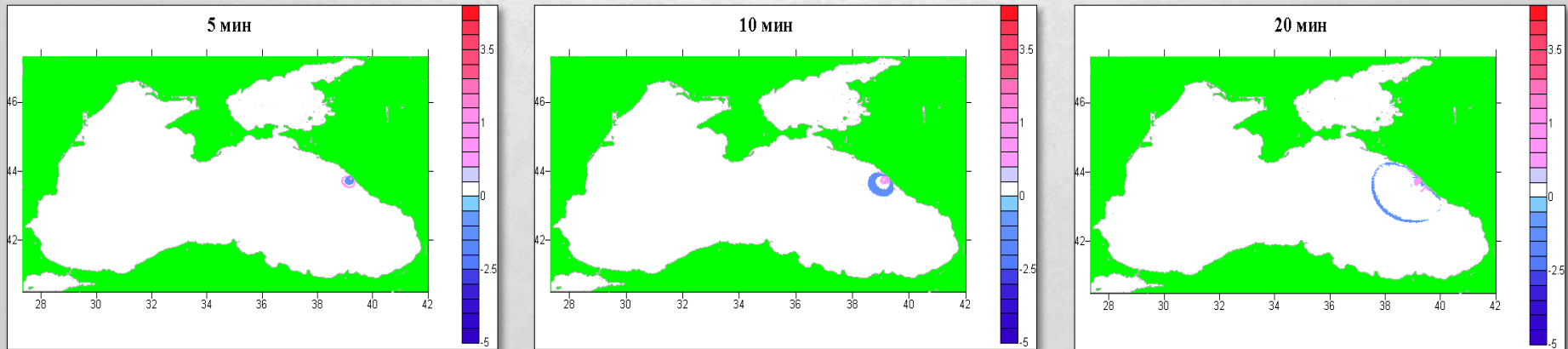


# Моделирование возможных оползневых цунами в Чёрном море

Согласно данным [Никонов, 1997а,б], не было зарегистрировано ни одного сейсмического толчка в районе г. Сочи (Россия), однако 4 декабря 1970 г. наблюдались колебания моря с высотой 80 см и периодом 5 мин около этого города. Предположим, что причиной маломощного цунами мог послужить сход подводного оползня. Учитывая, что эта часть побережья Черного моря является наиболее оползнеопасной [Гарагаш и Лобковский, 2000; Казанцев и Кругляков, 1998], естественно предположить, что цунами было вызвано подводным оползнем.



Движение подводного оползня



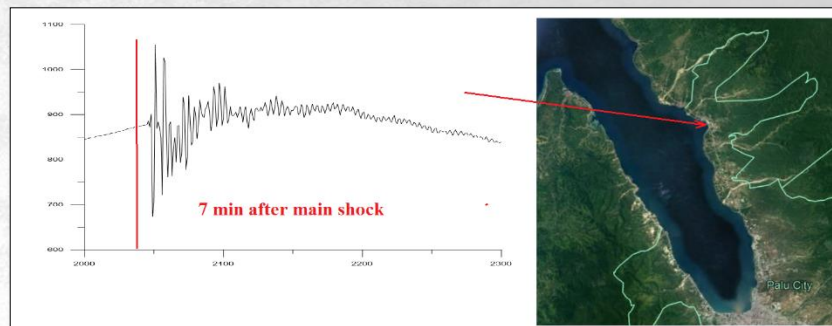
Пространственное распределение смещения уровня воды в различные моменты времени



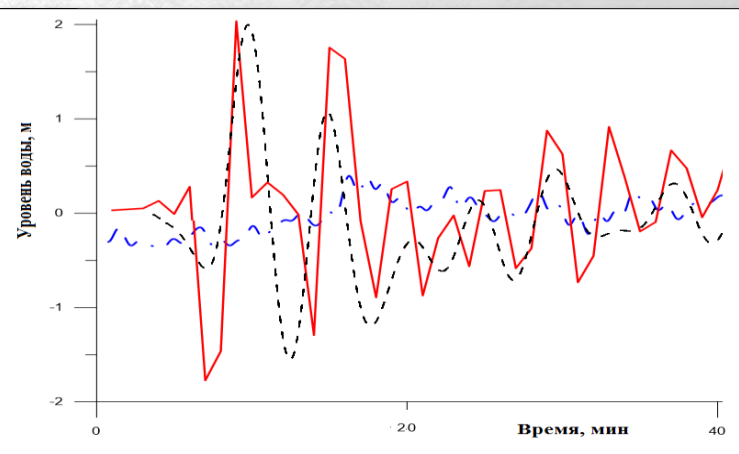
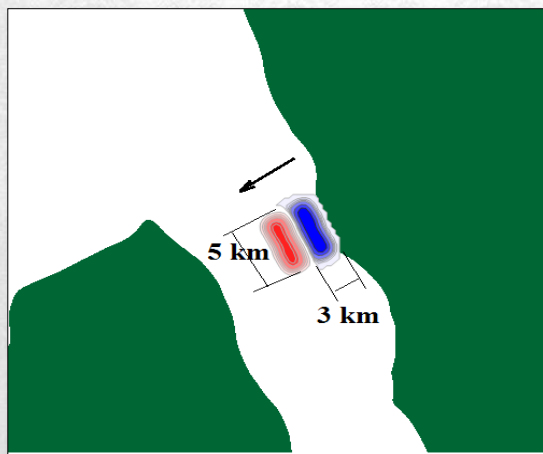
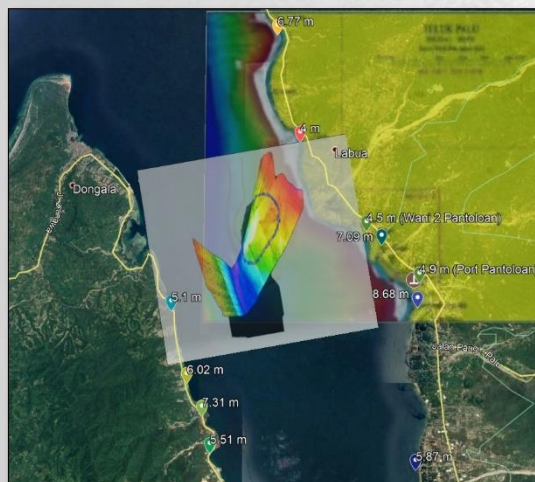
# Возникновение цунами 2018 года на острове Сулавеси: возможные очаги



Photo of landslides in the areas of Benteng (Buenteng) and Tamunggu (Tamungu) was captured by the pilot Icoze Mafella (<https://www.youtube.com/watch?v=WkrBP9bnTcw>) of Batik Air



Регистрация волны цунами на приливной станции Пантолан. Красной вертикальной линией показано время землетрясения и стрелкой - положение мареографа в бухте



Первичные данные морской геологии, полученные индонезийскими соавторами G. Prasetya and R. Hidayat под руководством Ню Susmoro (Indonesian Chief Hydrographer, Head of the Naval Hydrographic and Oceanographic Centre of the Republic of Indonesia) во время обследования 8-13 октября 2018 г.).

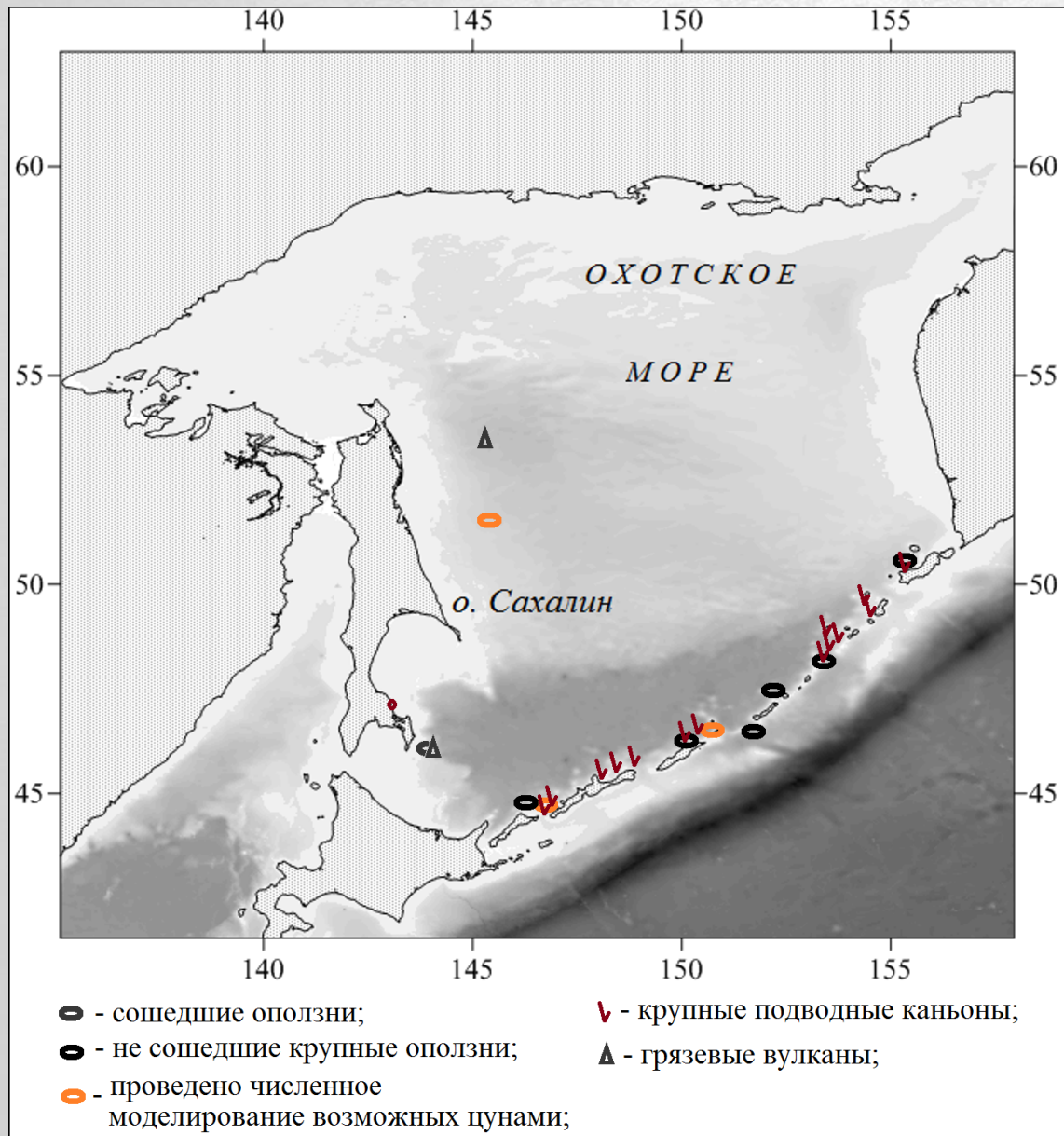
Для расчетов был выбран оползень, который расположен приблизительно в 8 км на северо-западе от п. Пантолан. Оползень имеет размеры 5 км длину 3 км ширина и около 3,5 м высотой.

Измеренная мареограмма (сплошная линия) и рассчитанная от землетрясения (пунктирная с точкой линия) и от оползня (пунктирная линия).

*Зайцев А.И., Пелиновский Е.Н., Ялченир А., Сусморо Н., Прасетья Г., Хидаят Р., Долгих Г.И., Долгих С.Г., Куркин А.А., Доган Г., Заибо Н., Пронин П.И. Возникновение цунами 2018 года на острове Сулавеси: возможные очаги Доклады Академии наук. 2019. Т. 486. № 3. С. 375-379.*



# Оползни в Охотском море



Бондаренко В.И., Петухин А.Г., Рашидов В.А. Опасность цунами оползневой природы в районе Курильской островной дуги. // В сб.: Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире (Геориск-2015), Москва, 12-14 октября 2015 г. С. 132-137.

Иванова А.А., Куликов Е.А., Файн И.В., Баранов Б.В. Генерация цунами подводным оползнем вблизи восточного побережья о. Сахалин. // Физика земли, атмосферы и гидросферы. ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 2018. № 2. С. 111-116.

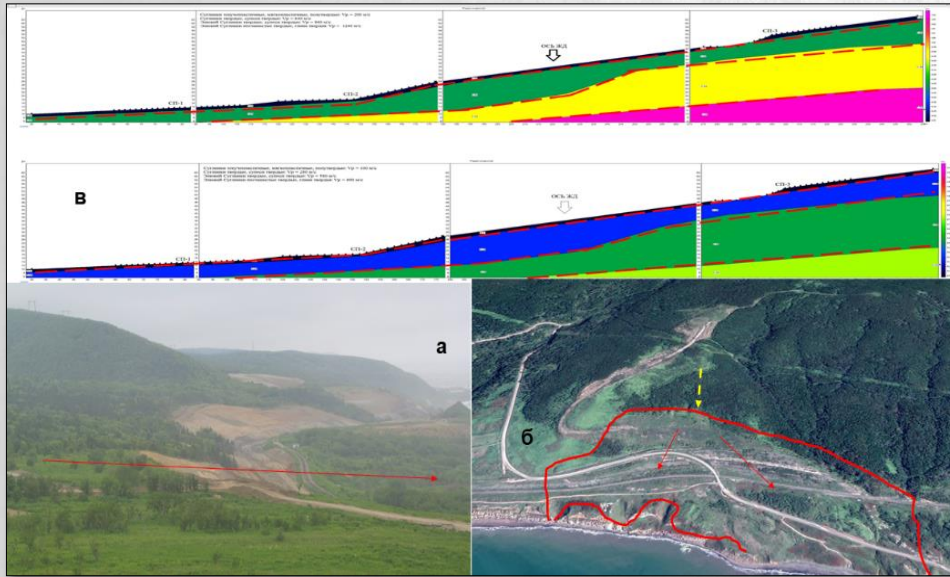
Баранов Б.В., Куликов Е.А., Рабинович А.Б., Дозорова К.А. Подводные оползни на восточном склоне о. Сахалин: триггерные механизмы и опасные последствия. // Тектоника и геодинамика северо-западной части Тихоокеанского региона.

Баранов Б.В., Дозорова К.А., Рукавишников Д.Д. Активная тектоника и образование оползневых тел на восточном склоне о. Сахалин. // Вестник МГТУ, том 19, № 1/1, 2016. С. 61-69.

Обжиров А.И., Баранов Б.В., Шакиров Р.Б., Прокудин В.Г., Мальцева Е.В. Оползневые процессы в районе юго-западного склона Курильской котловины Охотского моря. // Океанология. Геосистемы переходных зон, 2018. Т 2. № 2. С. 92-98.



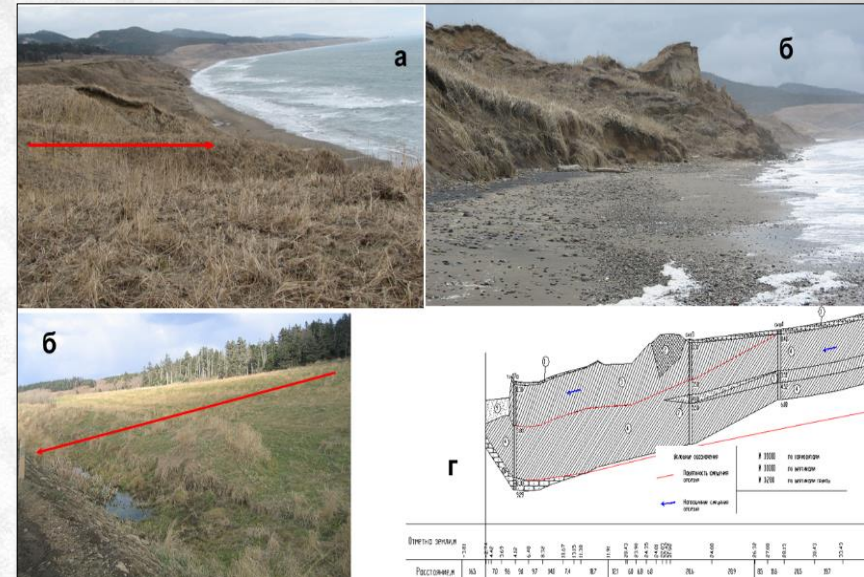
# Антропогенные оползни на о. Сахалине ( Казаков Н.А.)



Оползень вязкопластического скольжения на западном побережье о. Сахалина



Оползень вязкопластического течения на западном побережье о. Сахалина (117-119 км железной дороги). Размещение отвала строительных грунтов на теле оползня вызвала активизацию оползневых процессов.



Оползень вязкопластического скольжения на западном побережье о. Сахалина между с. Ильинское и с. Белинское, (а, б, в), по поверхности которого проложена автомобильная дорога (стрелки – направление движения оползня). Литологический разрез оползневого массива (г). Основные поверхности скольжения оползня выделены красной линией.

Оползень представляет собой древний оползень вязкопластического течения, образовавшийся на западных склонах массива г. Михайлова (187,0 м абс.). Оползневой массив сложен, преимущественно, глинистыми и суглинистыми породами, легко размокаемыми и переходящими в текучее состояние при избыточном увлажнении.

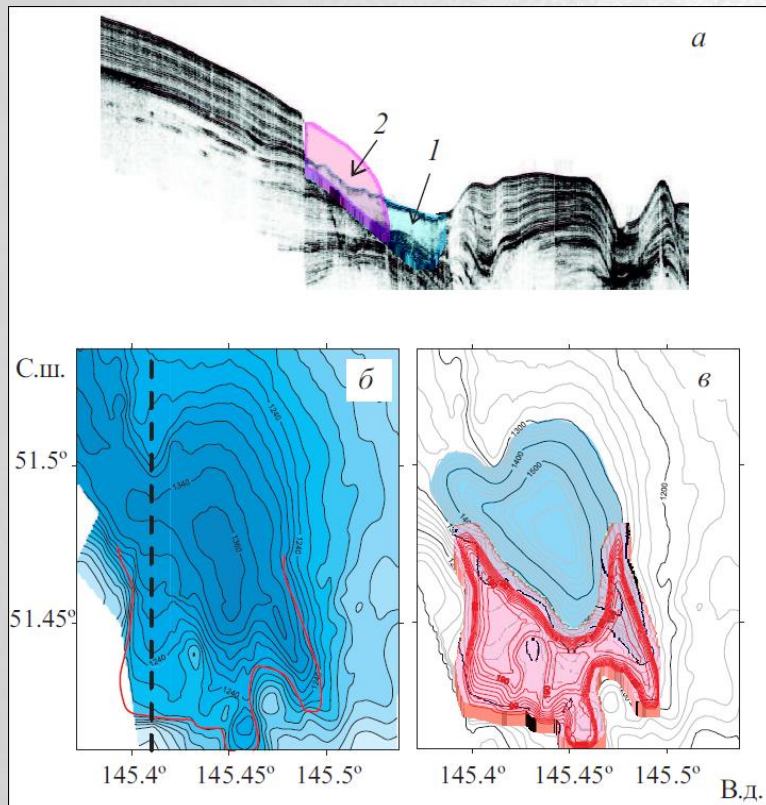
Активизация оползня, произошедшая вследствие пригрузки оползневого массива автомобильной дорогой и изменения его гидрогеологической условий, повлекла за собой в 2006 – 2008 г.г. разрушение дорожного полотна. Для защиты автомобильной дороги от оползневых процессов дорога была перенесена за границы оползневого массива.



# Подводный оползень на восточном склоне о. Сахалин

Площадь оползня: 42 км<sup>2</sup>.

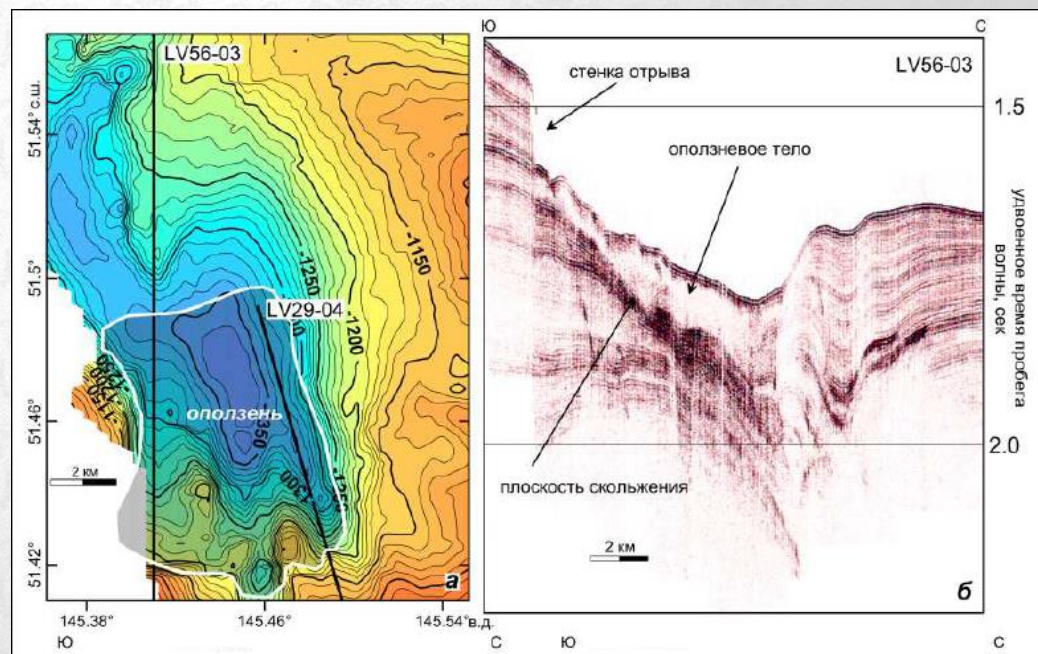
Объем оползня: около 4 км<sup>3</sup>.



Согласно численным расчетам этих авторов высота волн на берегу о. Сахалин могла достигать 18 м.

Стенка отрыва оползня:

- угол наклона 25°-30°;
- протяженность 22 км;
- имеет извилистые очертания;
- состоит из нескольких уступов.



Согласно численным расчетам этих авторов высота наката на берег о. Сахалин до 10-12 м.

# Численное моделирование схода подводный оползня на восточном склоне о. Сахалин

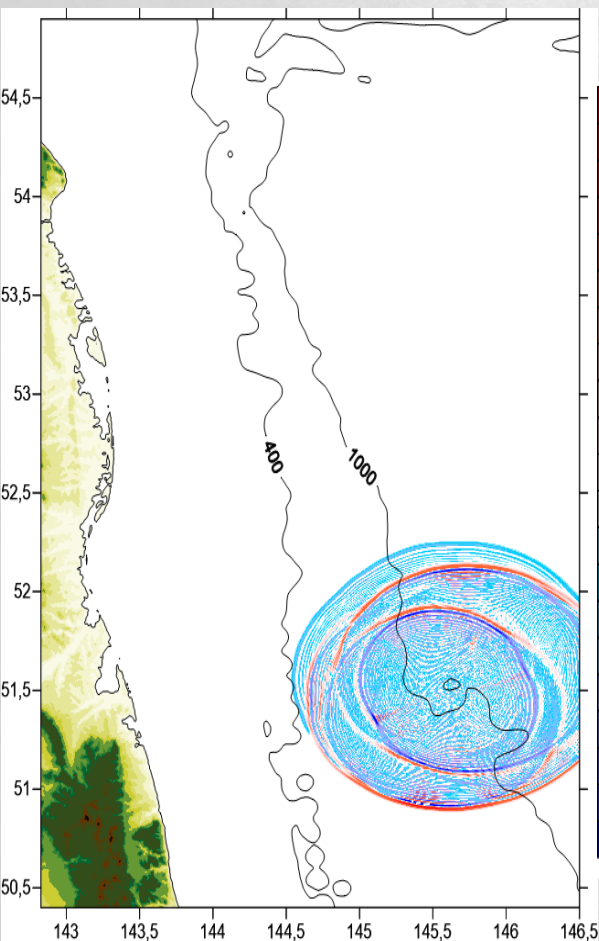


Рис. Волна через 10 мин

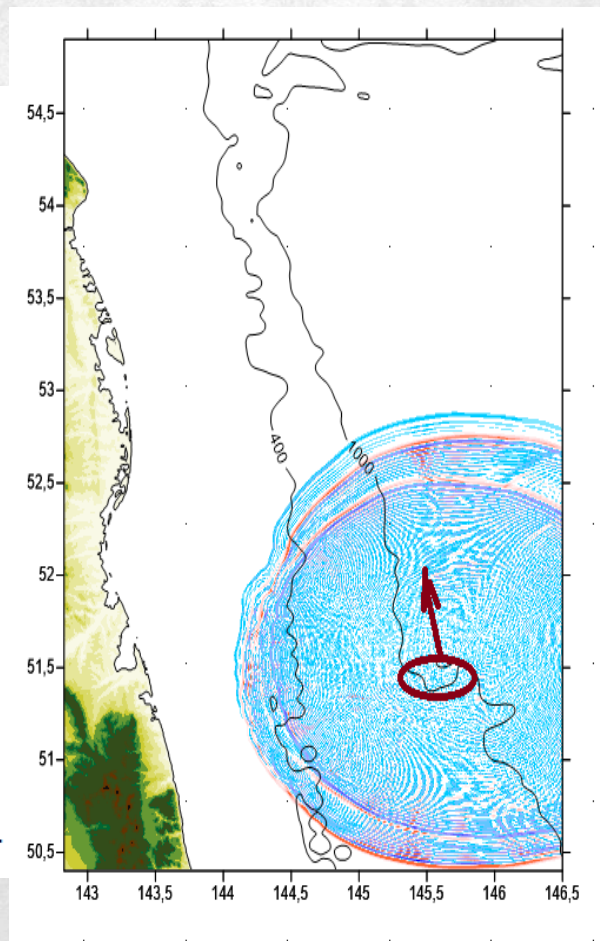


Рис. Волна через 20 мин

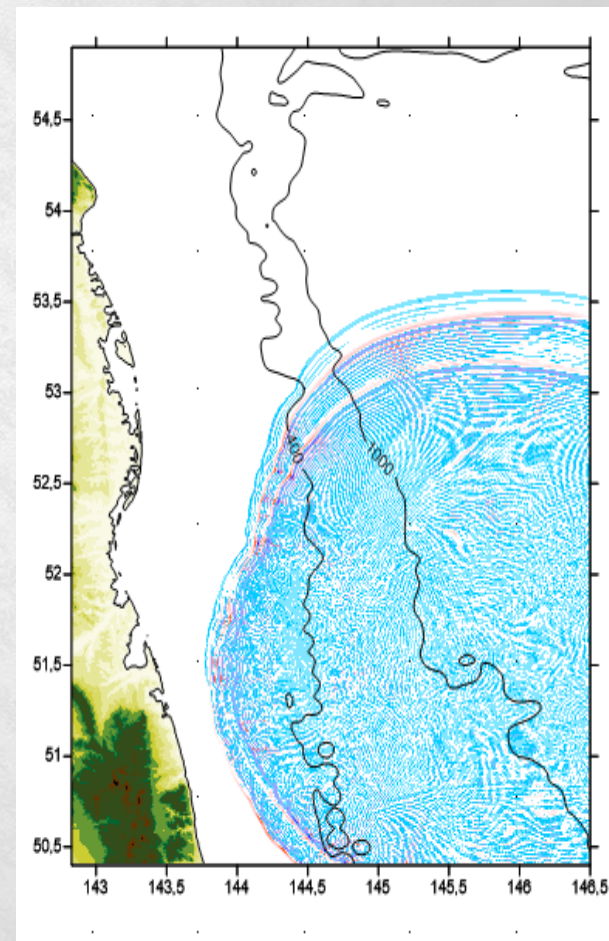


Рис. Волна через 40 мин



## **Выводы:**

- 1. Численная модель генерации и расчета распространения длинных волн от подводных оползней**
- 2. Бенчмарк тестирование численной модели**
- 3. Результаты моделирования цунами от подводных оползней в Средиземном море, Черном море, в районе о. Сулавеси (Индонезия)**
- 4. Подводные оползни в Охотском море**
- 5. Результаты моделирования гипотетического оползневого цунами в Охотском море (восточное побережье о. Сахалин) показали, что высоты волн могут составлять 12 м на ближайшем побережье.**