



Международная конференция «Математические и информационные технологии, MIT-2011»
(IX конференция «Вычислительные и информационные технологии
в науке, технике и образовании»)

*Врнячка Баня, Сербия, 27–31 августа 2011 г.
Будва, Черногория, 31 августа – 5 сентября 2011 г.*

Математическое моделирование оползневых (аномальных) волн цунами в реальных акваториях

С.А.Бейзель, Л.Б.Чубаров

Институт вычислительных технологий СО РАН

Новосибирск, Россия

Предыдущие исследования:

- **Примитивная** структура рельефа дна: линейный склон, сопряженный с участком дна постоянной глубины
- **Упрощенный** закон движения

Вопросы:

- Нелинейность, дисперсия – где и когда?
- Какая НЛД-модель лучше?

Методология:

- Численное моделирование (модели теории мелкой воды, полная модель потенциальной жидкости)
- Лабораторные эксперименты

Сейчас:

Переход от **от модельной батиметрии к реальной и от одномерных расчетов к двумерным,**.

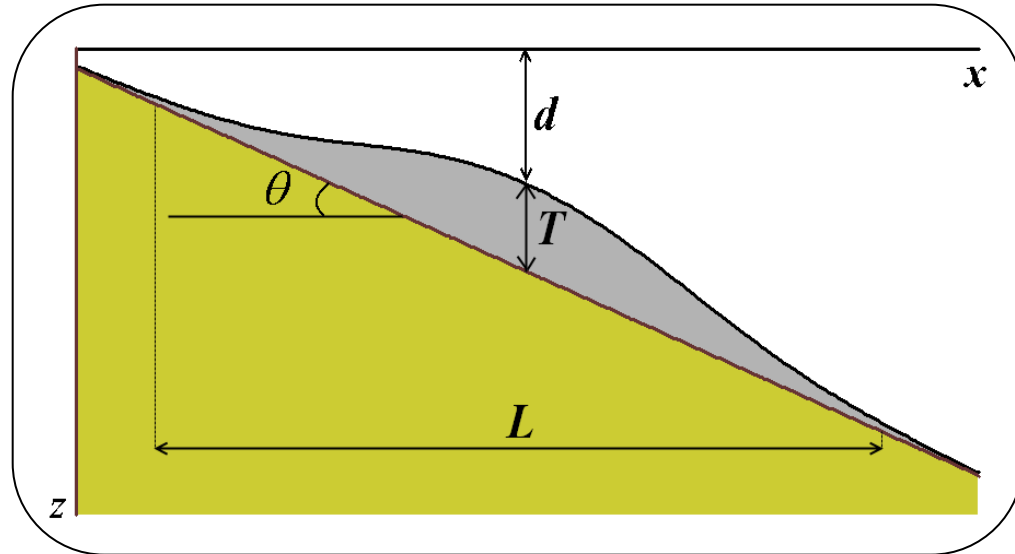
Основные обозначения

$$z = -H(x, y, t) =$$

$$= h_{bt}(x, y) + h_{sl}(x, y, t)$$

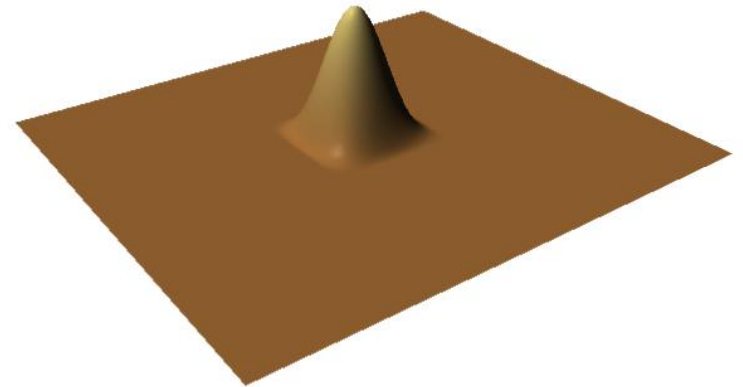
$z = h_{bt}(x, y)$ – недеформируемое дно

$z = h_{sl}(x, y, t)$ – оползень



$$h_{sl}(x, y, t) = h_{sl}(x + x_{c0} - x_c(t), y + y_{c0} - y_c(t))$$

$x_c(t), y_c(t)$ – координаты центра масс оползня



L – длина,

ρ_{sl} – плотность оползня,

V – объем,

ρ_w – плотность воды,

T – толщина,

$\gamma = \frac{\rho_{sl}}{\rho_w}$ – относительная плотность,

W – ширина

d – начальное заглубление

Уравнения движения. 1D

$$\rho_{sl} V \frac{d^2 S}{dt^2} = F_a + F_g + F_b + F_d + F_n$$

F_a – сила присоед. массы, F_g – сила тяжести, F_n – сила трения,

F_b – сила выталкивания, F_d – сила гидродин. сопротивления

Линейный склон: $h_{bt}(x) = -x \tan \theta$, $\theta = \text{const}$ Пелиновский-Поплавский, Watts-Grilli

$$(\rho_{sl} + C_w \rho_w) V \frac{d^2 S}{dt^2} = (\rho_{sl} - \rho_w) V g (\sin \theta - C_f \cos \theta) - \frac{1}{2} C_d \rho_w T W \left(\frac{dS}{dt} \right)^2$$

Произвольный склон: $\theta = \theta(x)$

Г.С. Хакимзянов

$$(\rho_{sl} + C_w \rho_w) V \frac{d^2 S}{dt^2} = (\rho_{sl} - \rho_w) W g I_1 - \sigma W \left[(\rho_{sl} - \rho_w) I_2 + \frac{1}{2} C_d \rho_w T \right] \left(\frac{dS}{dt} \right)^2$$

$$I_1 = \int_{x_l(t)}^{x_r(t)} h_{sl}(x + x_{c0} - x_c(t)) \left[\sin \theta(x) - \sigma C_f \cos \theta(x) \right] dx$$

$$I_2 = C_f \int_{x_l(t)}^{x_r(t)} h_{sl}(x + x_{c0} - x_c(t)) K(x) dx$$

$$K(x) = h_{bt}''(x) \left(\sqrt{1 + [h_{bt}'(x)]^2} \right)^{-3} \text{ – кривизна}$$

C_w – коэф. присоед. массы

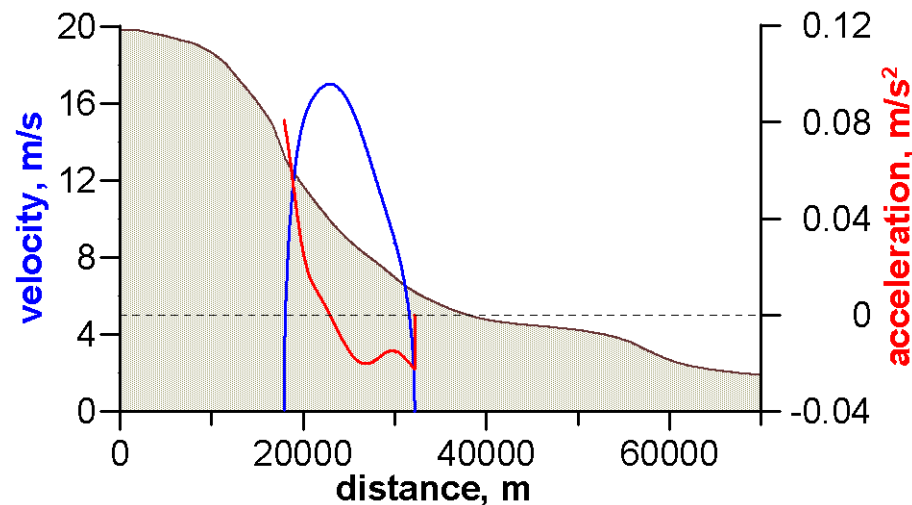
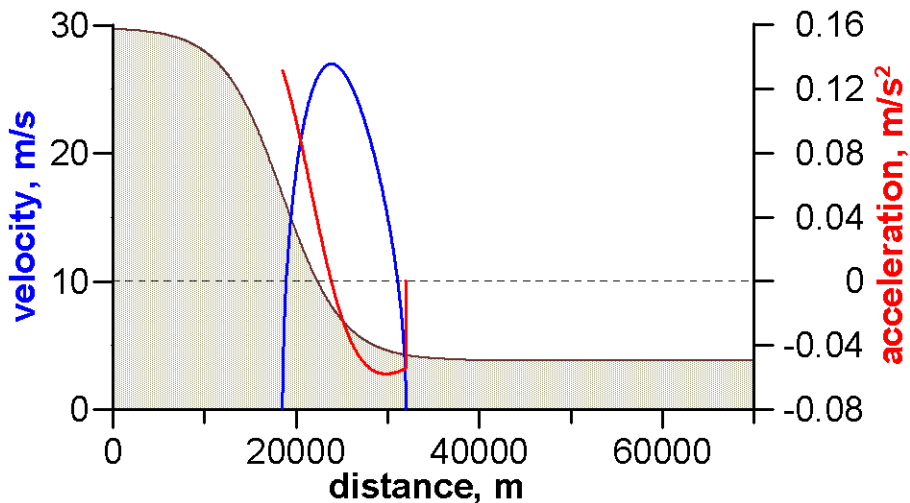
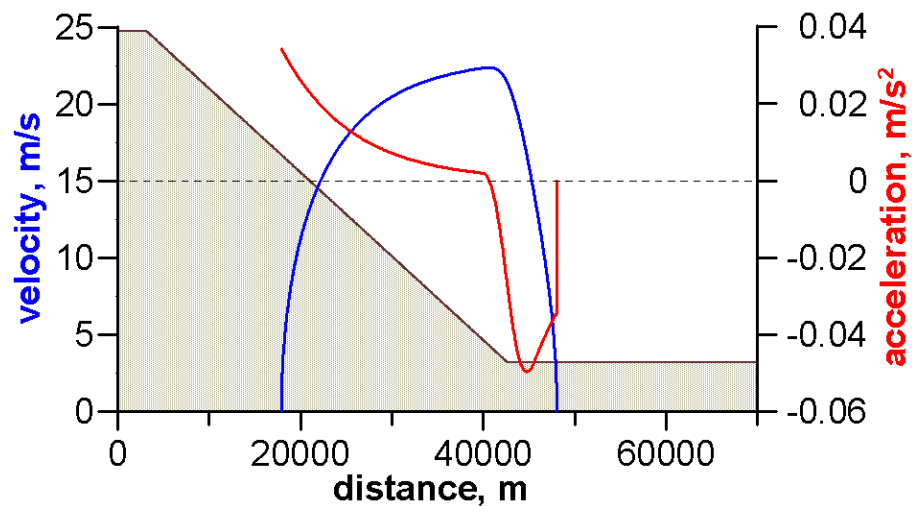
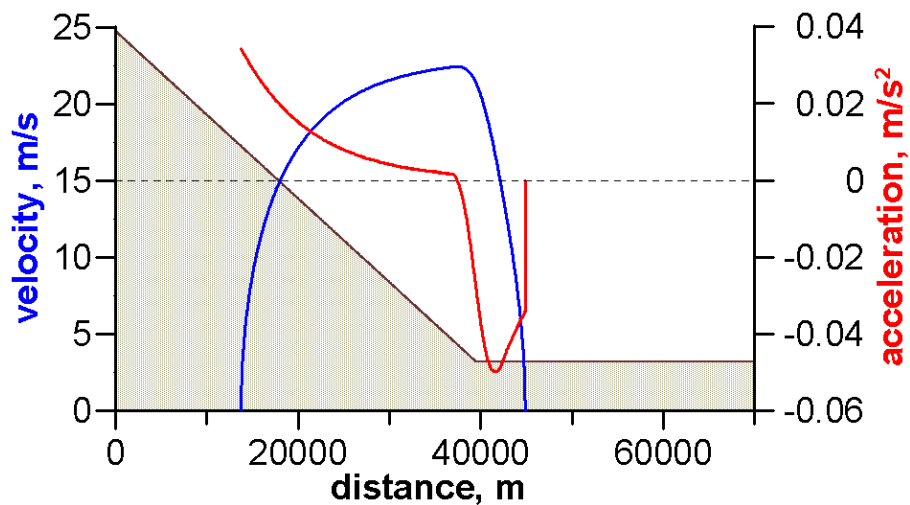
C_d – коэф. сопротивления

$C_f = \tan \theta_*$

θ_* – угол трения

$\sigma = \text{sgn } u$

Модельные рельефы



Уравнения движения. 2D

$$z = -h(x, y, t) = h_{bt}(x, y) + h_{sl}(x, y, t)$$

$$m\ddot{x}_c = F_1, \quad m\ddot{y}_c = F_2, \quad m\ddot{z}_c = F_3$$

$$x = q^1, \quad y = q^2, \quad z = h_{bt}(x, y)$$

$$x = x(q^1, q^2), \quad y = y(q^1, q^2), \quad z = z(q^1, q^2)$$

$$m \frac{dv_\alpha}{dt} = \frac{m}{2} \left[(g_{11})_{q_\alpha} (v^1)^2 + 2(g_{12})_{q_\alpha} v^1 v^2 + (g_{22})_{q_\alpha} (v^2)^2 \right] + F_{\tau_\alpha} \sqrt{g_{\alpha\alpha}}$$

$$\alpha = 1, 2$$

$$\frac{dq^\alpha}{dt} = v^\alpha$$

$$m = (\rho_{sl} + C_w \rho_w) V \quad F_{\tau_\alpha} = F_{g,b,\tau_\alpha} + F_{d,\tau_\alpha} + F_{n,\tau_\alpha}$$

сила тяжести и выталкивания:

$$F_{g,b,\tau_\alpha} = - \iint_{D_t} g (\rho_{sl} - \rho_w) \frac{h_{sl}(q^1, q^2, t)}{\sqrt{g_{\alpha\alpha}}} \frac{\partial h_{bt}}{\partial q^\alpha} dq^1 dq^2$$

сила гидродин. сопротивления:

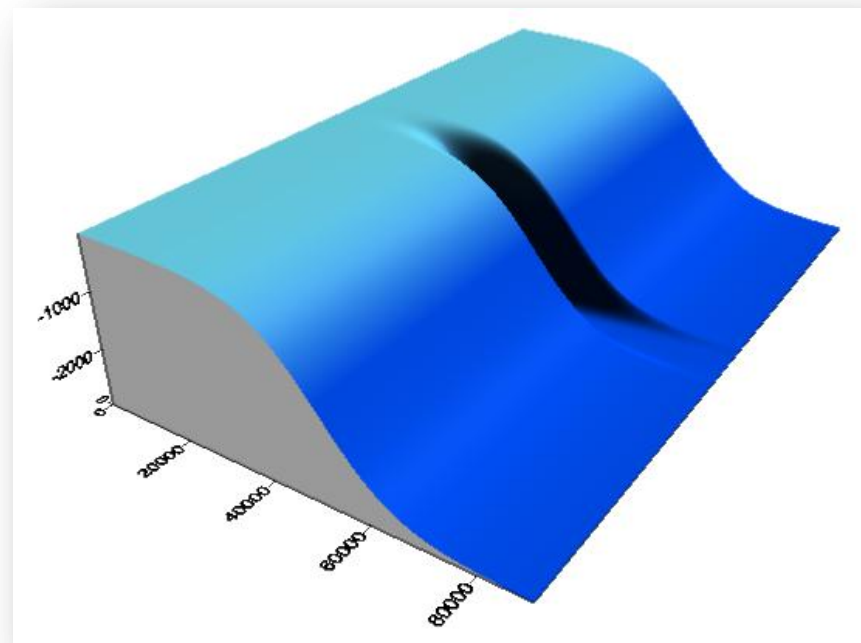
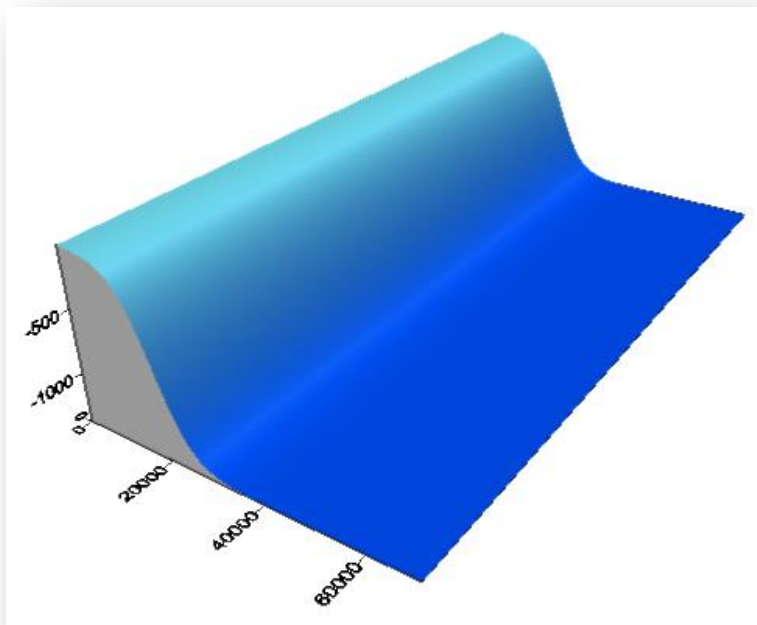
$$F_{d,\tau_\alpha} = - \frac{1}{2} C_d \rho_w \Pi v_c^2 \frac{v_\alpha}{v_c \sqrt{g_{\alpha\alpha}}}$$

сила трения:

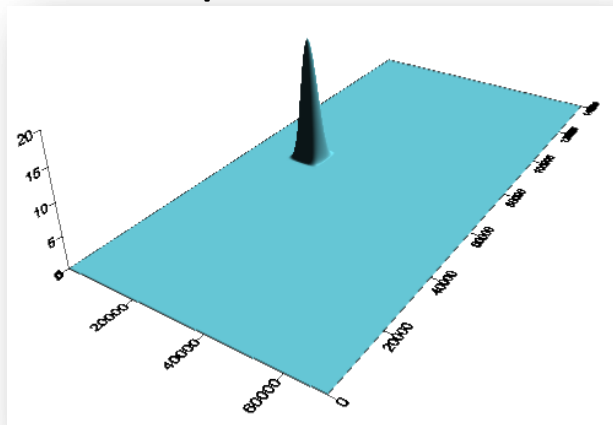
$$F_{n,\tau_\alpha} = C_f \frac{v_\alpha}{v_c \sqrt{g_{\alpha\alpha}}} \iint_{D_t} g (\rho_{sl} - \rho_w) \frac{h_{sl}(q^1, q^2, t)}{\sqrt{G}} \left[1 + \frac{1}{g} \left((v^1)^2 \frac{\partial^2 h_{bt}}{(\partial q^1)^2} + 2v^1 v^2 \frac{\partial^2 h_{bt}}{\partial q^1 \partial q^2} + (v^2)^2 \frac{\partial^2 h_{bt}}{(\partial q^2)^2} \right) \right] dq^1 dq^2$$

Задача о движении оползня по криволинейному склону. 2D

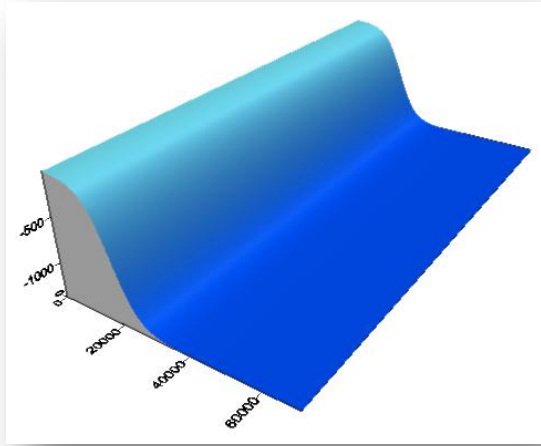
Примеры батиметрий



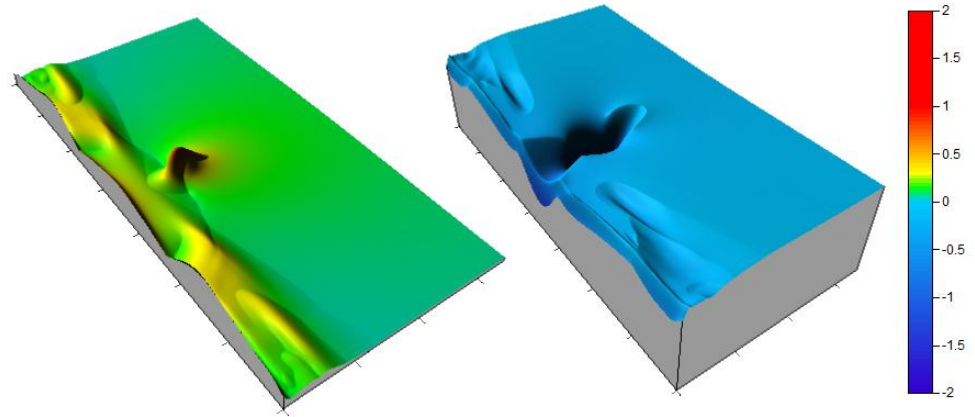
Форма оползня



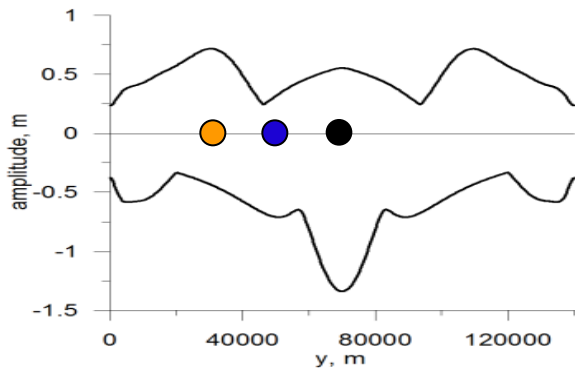
Пространственные характеристики волнового режима



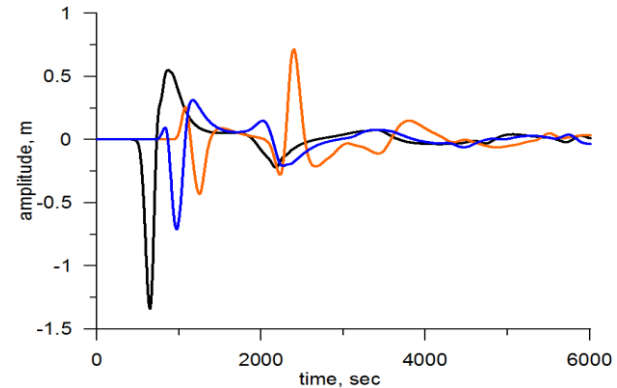
Свечения максимумов и минимумов



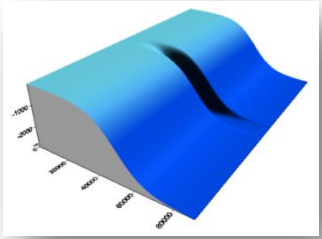
Максимальный и минимальный
заплески на «берег»



Мареограммы

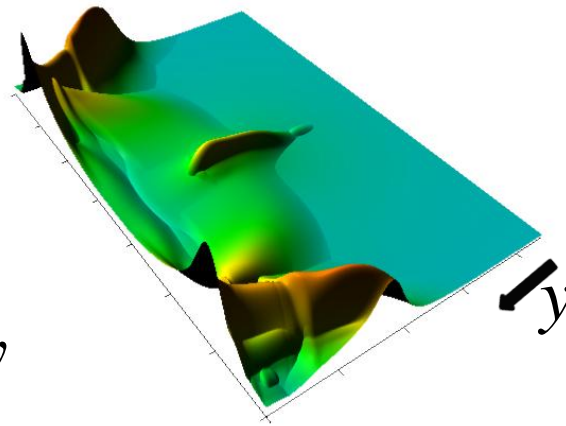
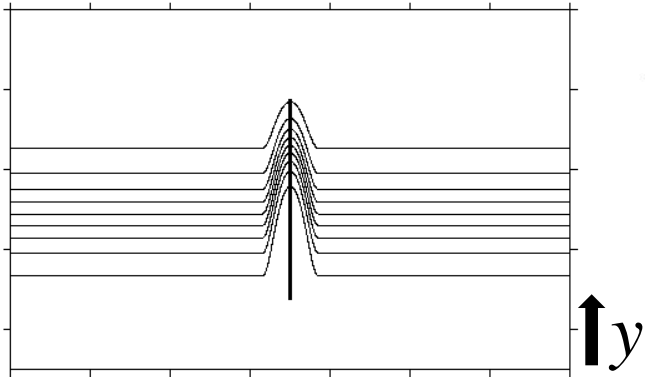


Движение по пространственно неоднородному склону

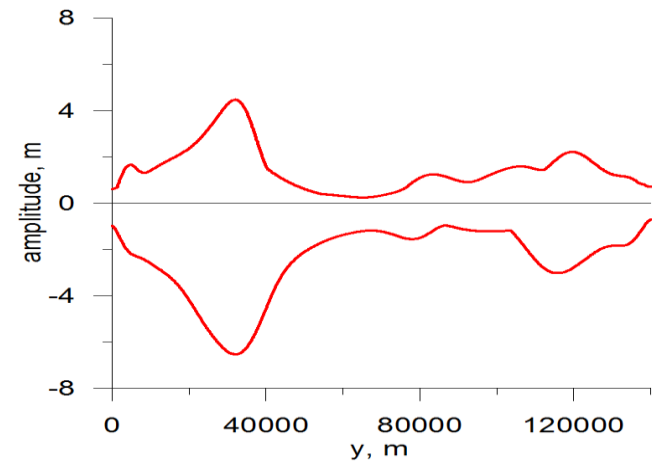
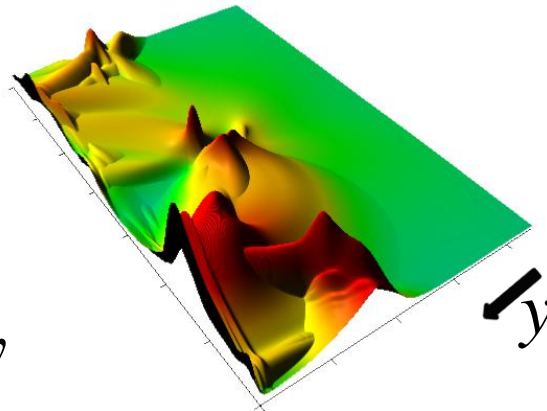
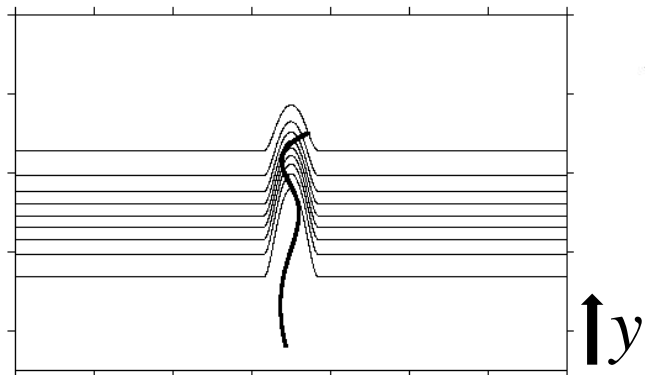
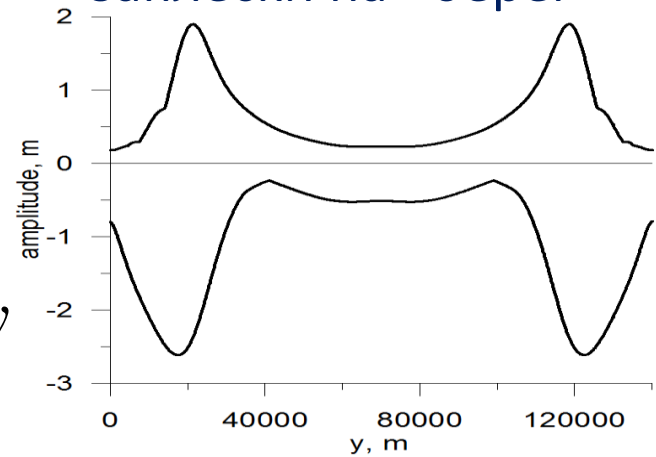


Свечения

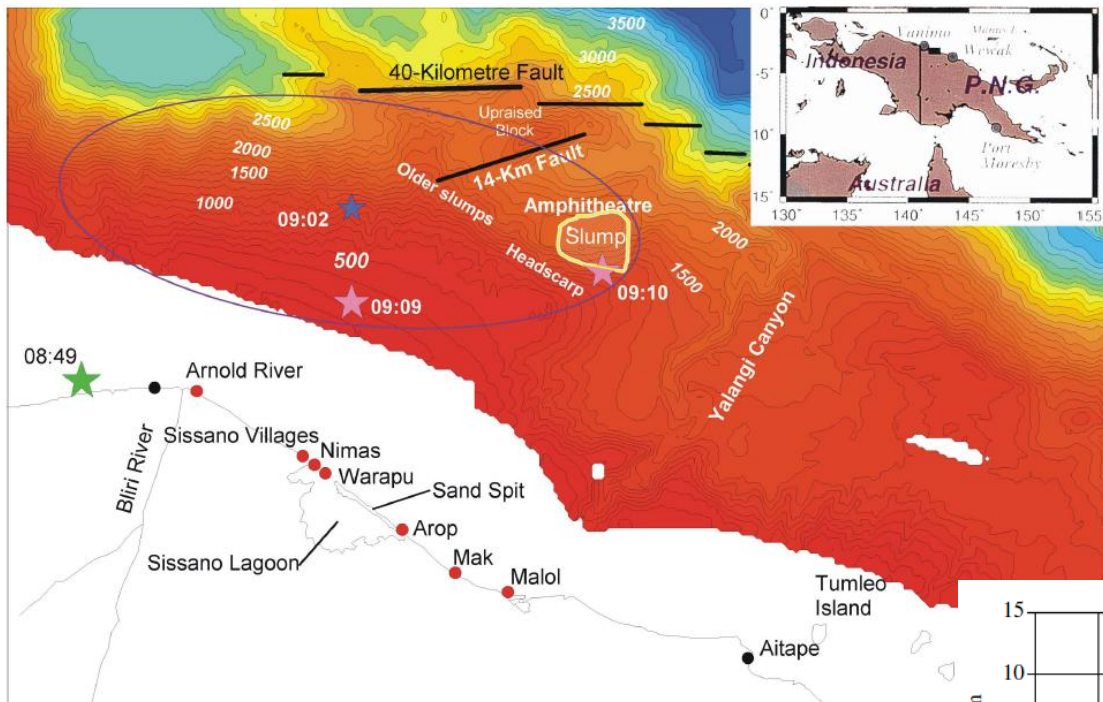
Траектории движения



Максимальный и минимальный заплески на «берег»



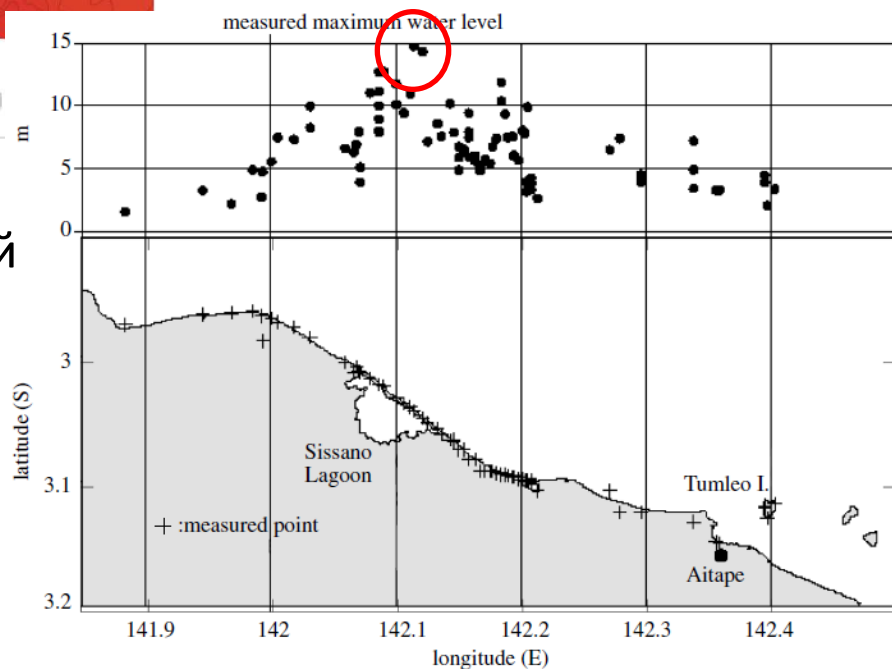
Цунами 17.07.1998 в Папуа-Новой Гвинее



17 июля вблизи Папуа-Новой Гвинеи произошло землетрясение магнитудой 7.2, через 20 минут после которого на побережье обрушились волны с высотой до 15 метров.

Время прихода волн, характер распределения их высот вдоль береговой линии и другие факторы говорят об оползневом механизме генерации.

Tappin D.R., Watts P., Grilli S.T.
**The Papua New Guinea tsunami of 17 July 1998:
anatomy of a catastrophic event**
// Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 8, 243–266, 2008.

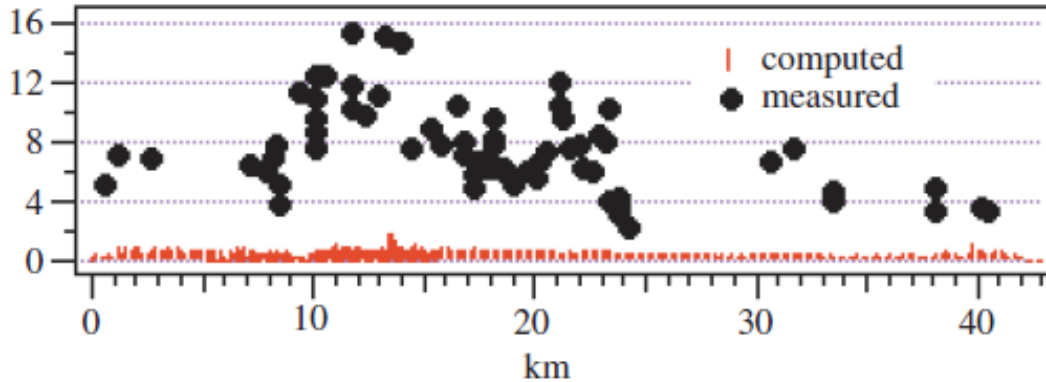


Цунами 17.07.1998 в Папуа-Новой Гвинее

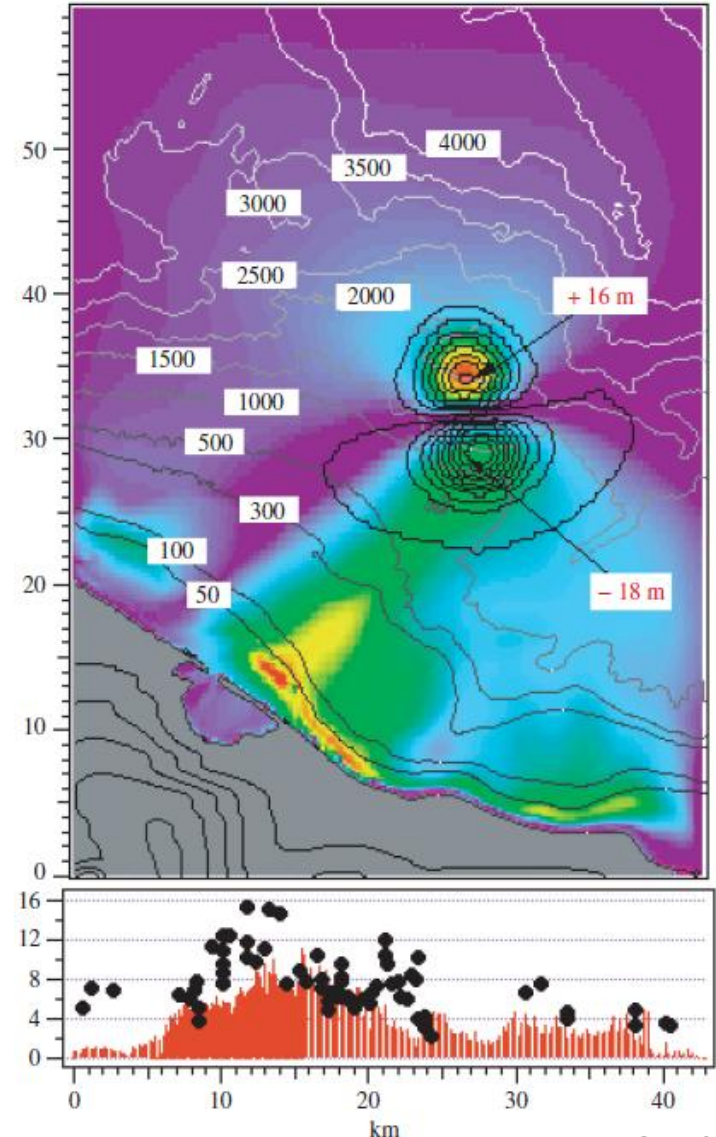
результаты моделирования: **различные источники**

Synolakis C.E., Bardet J.P., Borrero J.C., Davies H.L., Okal E.A., Silver E.A., Sweet S., Tappin D.R.

The slump origin of the 1998 Papua New Guinea tsunami // Proc. Royal. Soc., London, 458(2020), 763–790, 2002



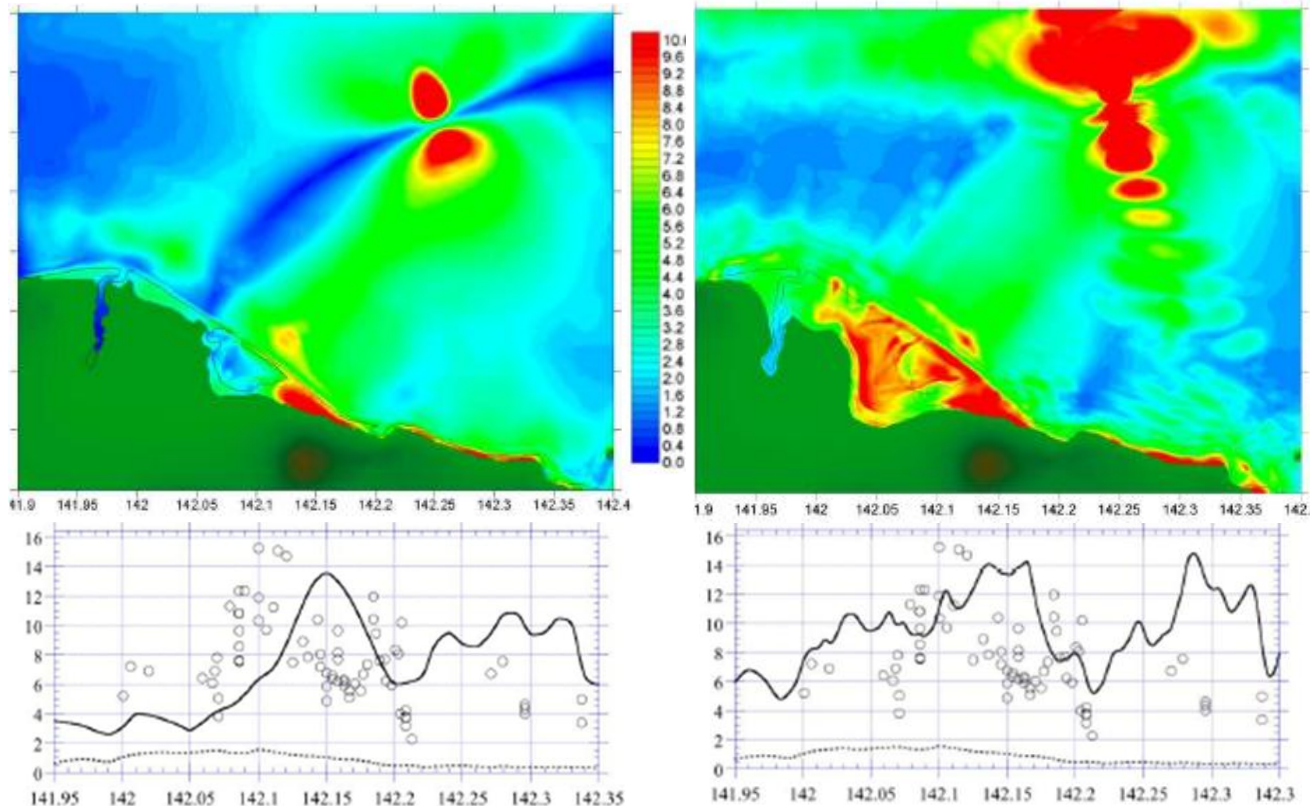
сейсмическая модель



оползневая модель с применением пакета TOPICS
(на основе одномерных модельных расчетов S.T.Grilli, P. Watts).

Цунами 17.07.1998 в Папуа-Новой Гвинее

результаты моделирования: **различные модели гидродинамики волн**



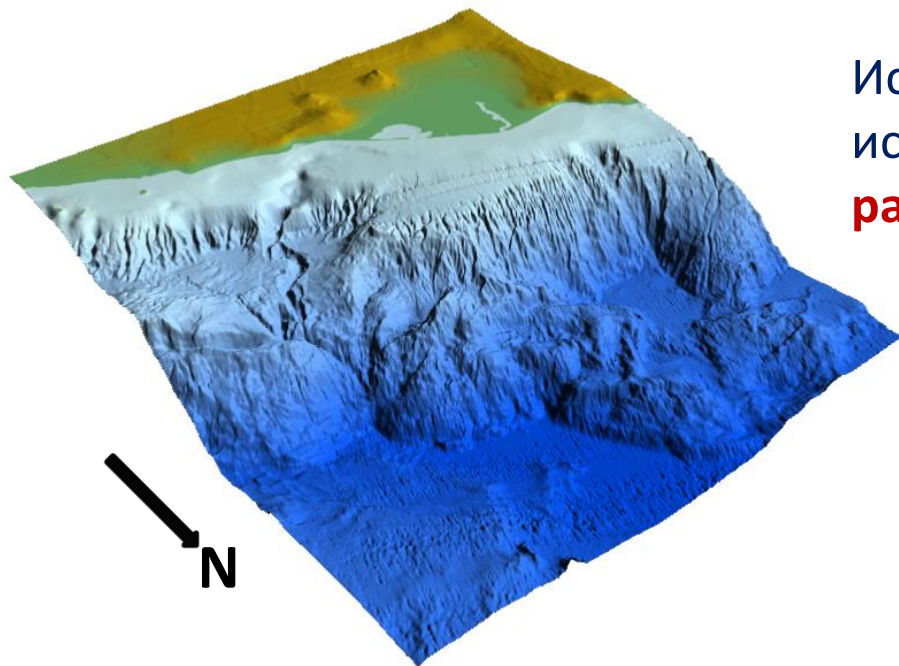
Результаты моделирования с использованием пакета TOPICS на основе уравнений мелкой воды (слева) и НЛД-модели (справа) с вычислением наката на берег.

Tappin D.R., Watts P., Grilli S.T.
The Papua New Guinea tsunami of 17 July 1998: anatomy of a catastrophic event // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2008. Vol. 8. P. 243–266

Другими авторами при моделировании этого события используются и другие модели оползневого механизма, например, представляющие оползень как жидкость

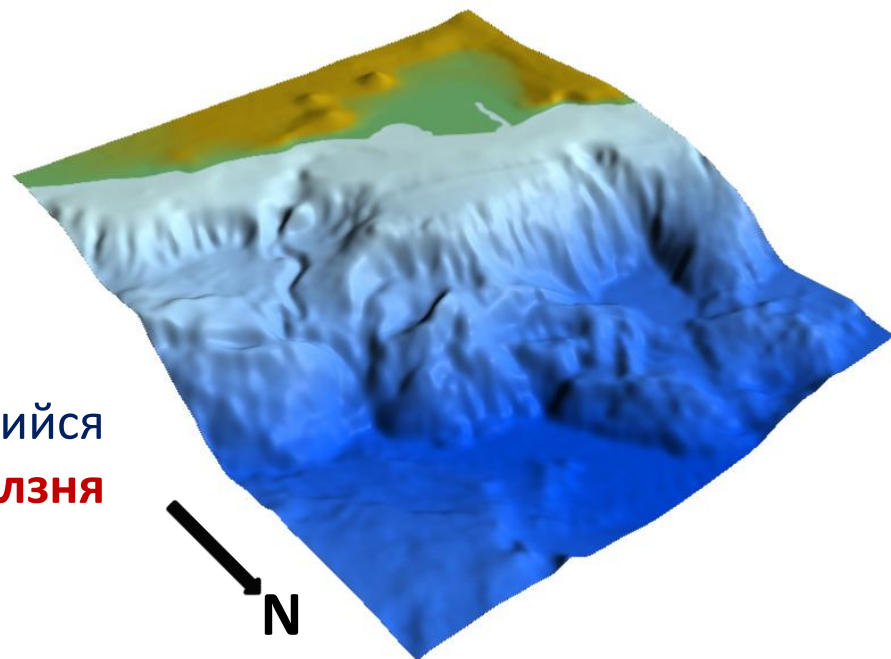
Heinrich P., Piatanesi A., Hebert H. **Numerical modeling of tsunami generation and propagation from submarine slumps: the 1998 Papua New Guinea event // Geophys. J. Intern. 2001. Vol. 145. P. 97–111**

Цунами 17.07.1998 в Папуа-Новой Гвинее
результаты моделирования: **модель квазинедеформируемого тела**



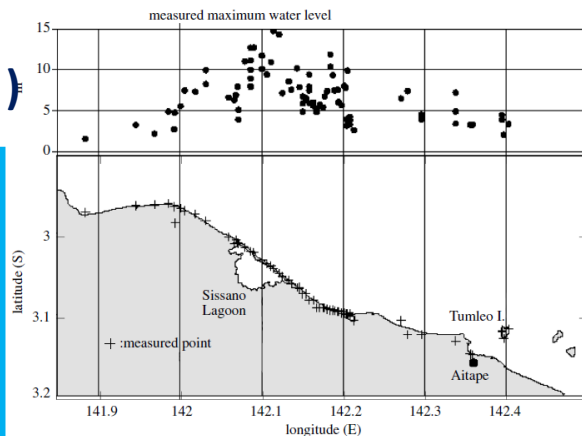
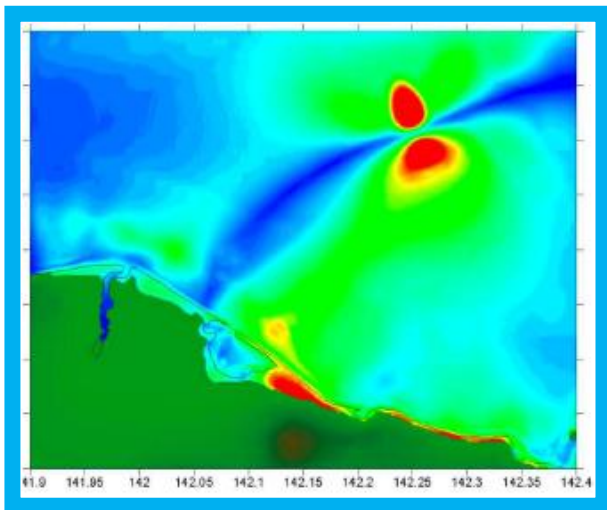
Исходный рельеф донной поверхности,
использующийся для расчета
распространения волн на воде

Сглаженный рельеф, использующийся
для расчета **движения оползня**

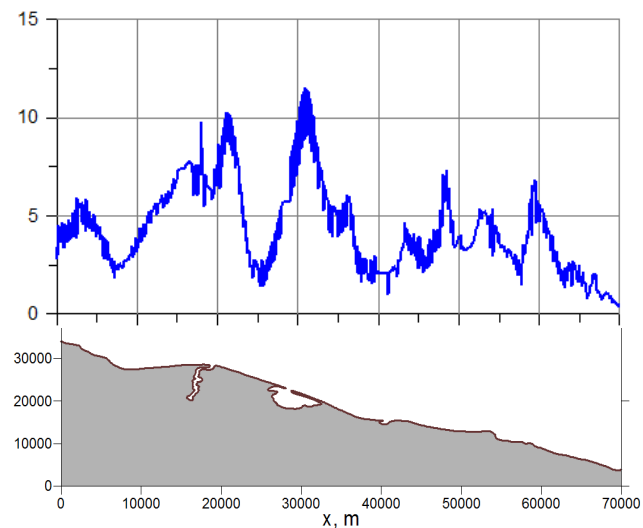
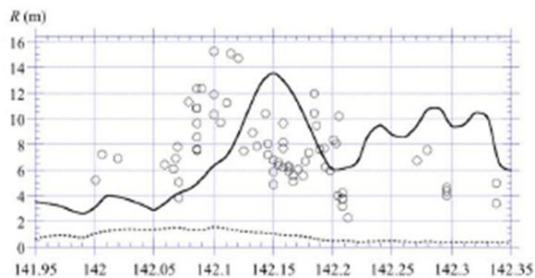
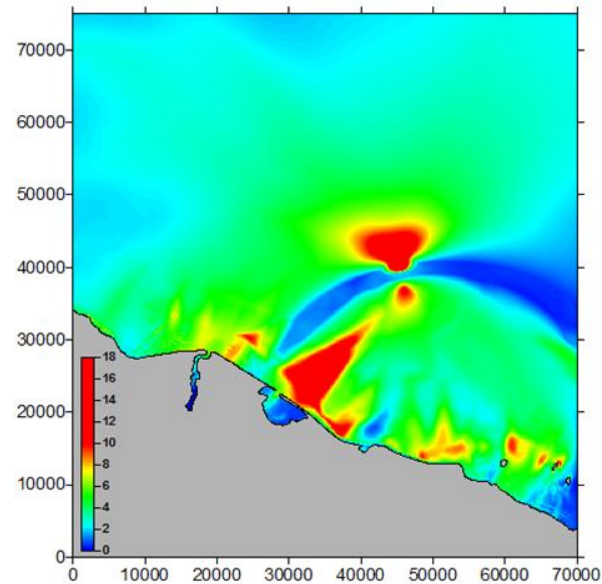


Цунами 17.07.1998 в Папуа-Новой Гвинее: результаты моделирования: сравнение результатов моделирования с данными «по TOPICS»

(Tappin D.R, Watts P, Grilli S.T.)



Результаты измерений

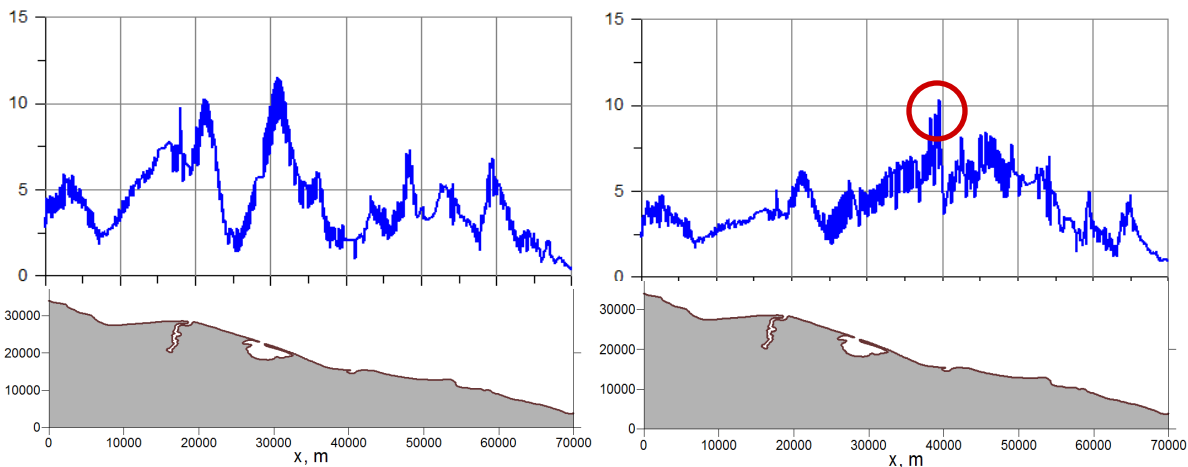
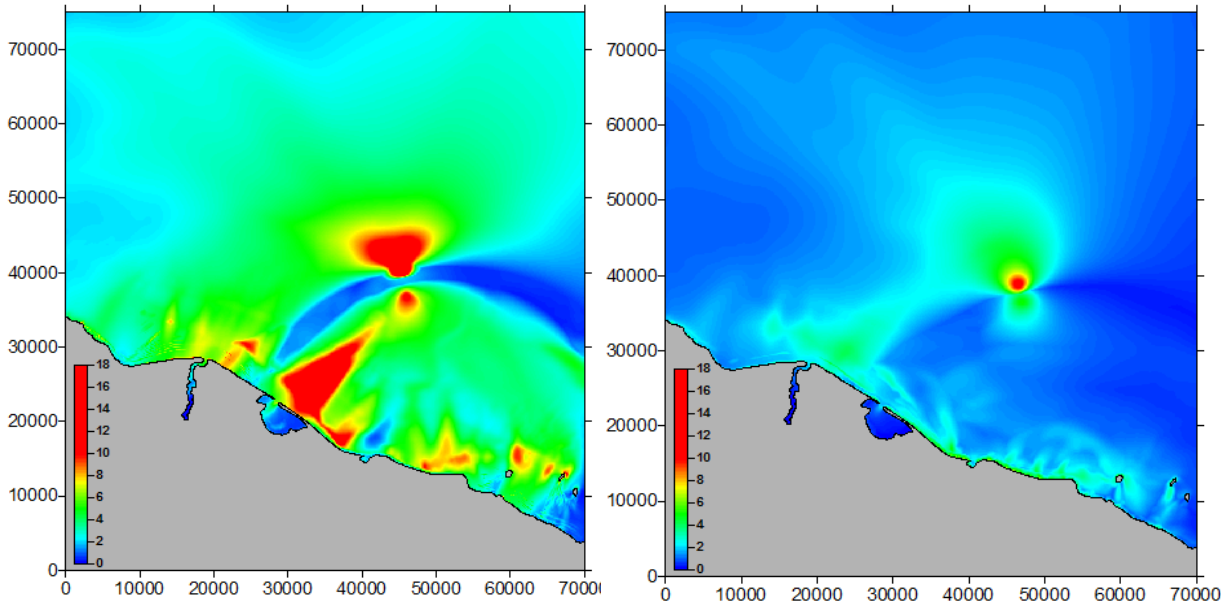


Цунами 17.07.1998 в Папуа-Новой Гвинее

результаты моделирования: сравнение различных способов моделирования оползневого механизма

Результаты наших расчетов с использованием начальных данных из TOPICS (слева) и по нашей модели квазинедеформируемого оползня (справа) с теми же параметрами.

На реальном рельефе при использовании нашей модели не удастся обеспечить движение тела в том же направлении и с теми же скоростью и ускорением.

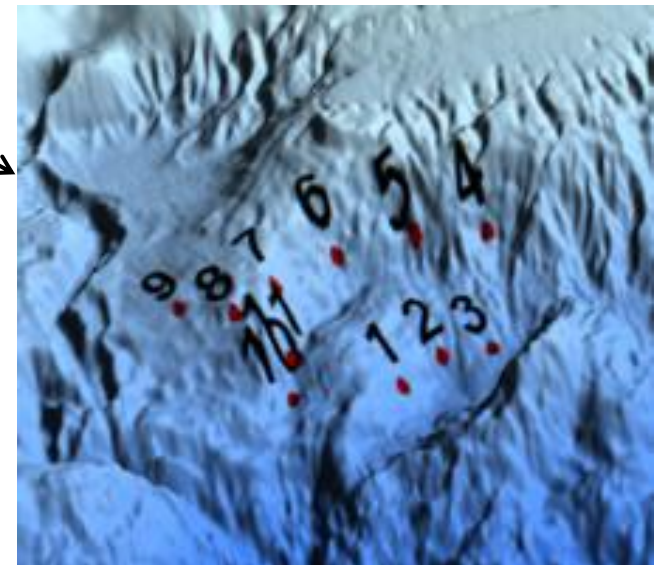
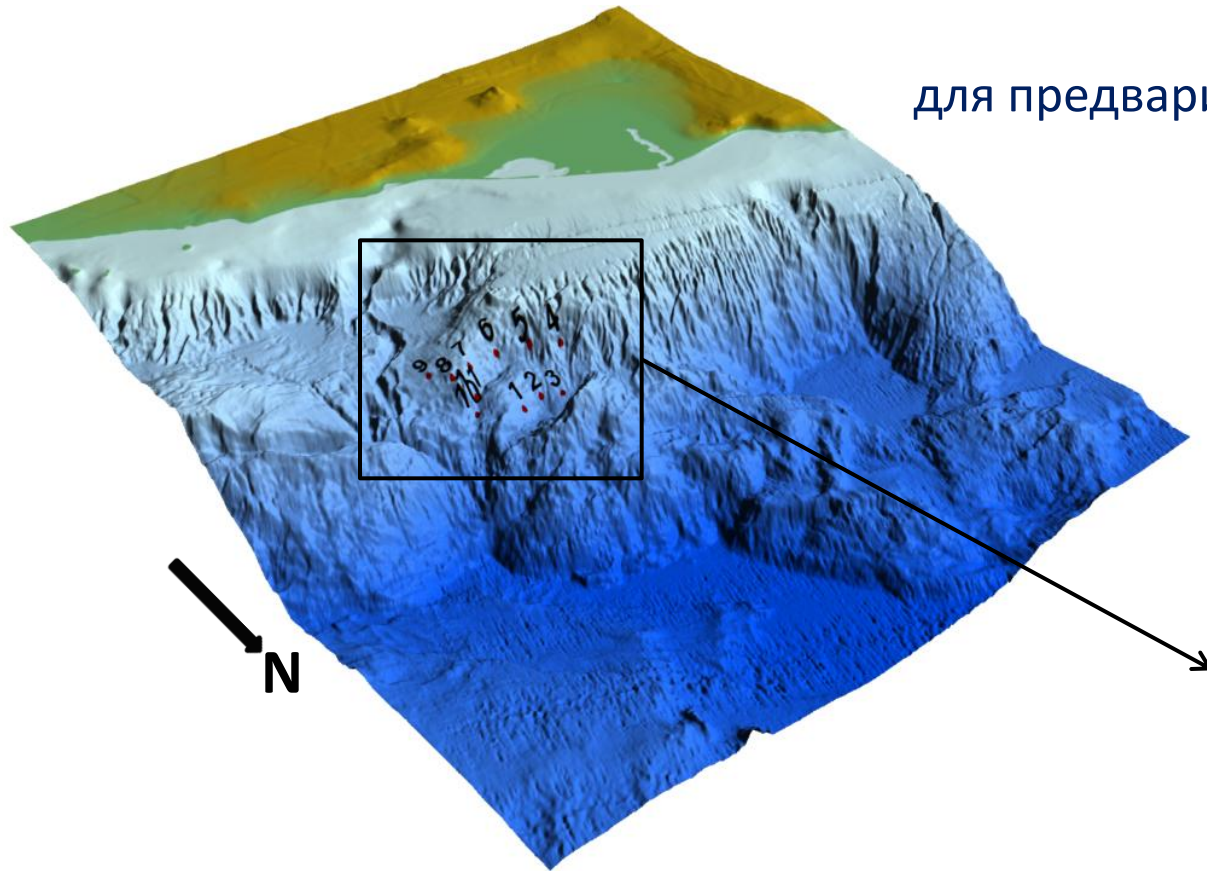


Цунами 17.07.1998 в Папуа-Новой Гвинее

результаты моделирования: **модель квазинедеформируемого тела.**

Выбор точки старта

11 точек начального расположения
центра масс оползня
для предварительных пробных расчетов

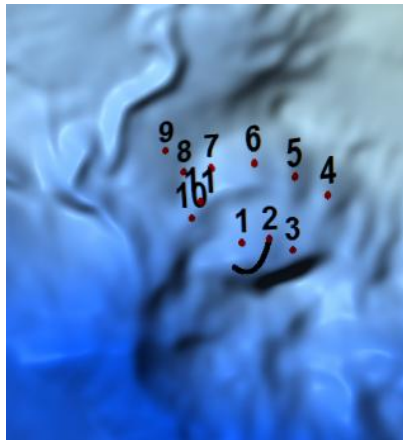


Цунами 17.07.1998 в Папуа-Новой Гвинее

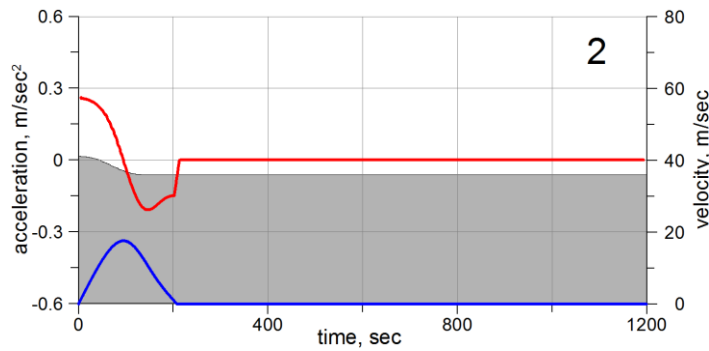
результаты моделирования: **модель квазинедеформируемого тела.**

Разные точки старта

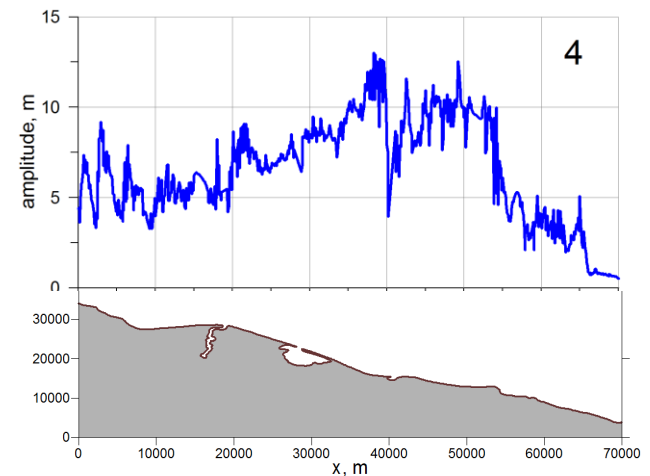
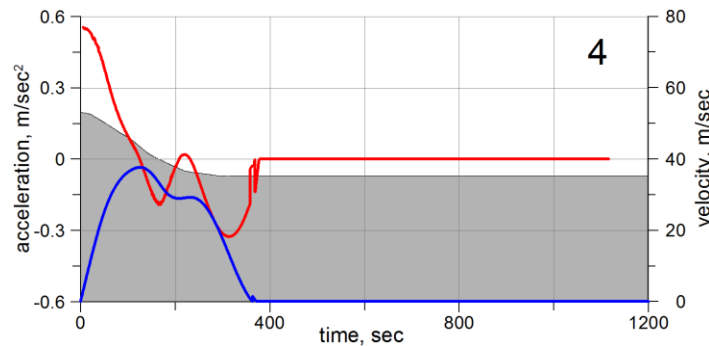
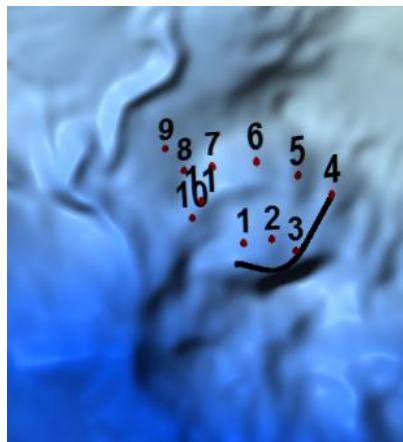
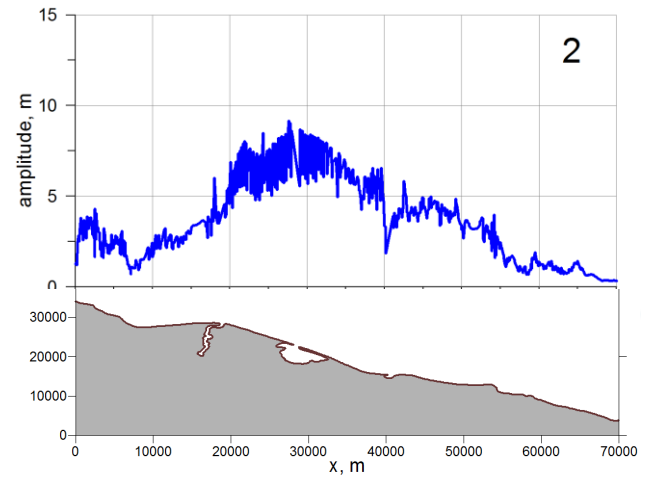
Траектории движения



Графики скорости и ускорения



Распределения вдоль побережья

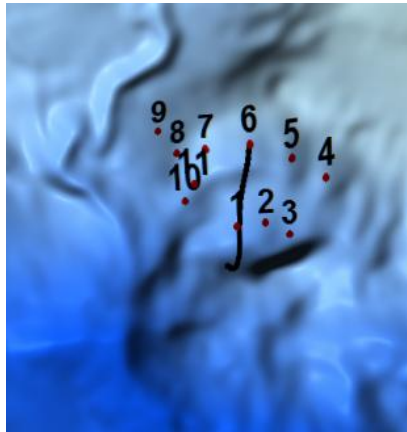


Цунами 17.07.1998 в Папуа-Новой Гвинее

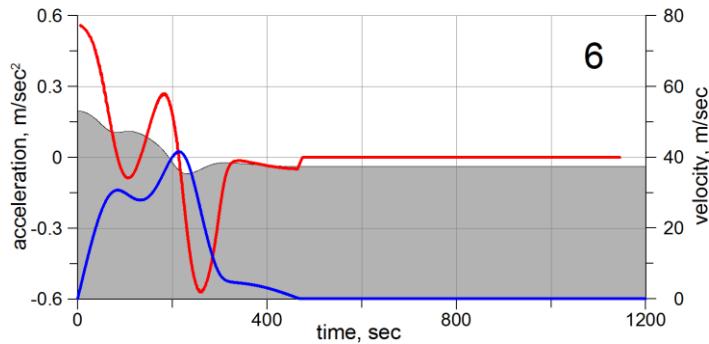
результаты моделирования: **модель квазинедеформируемого тела.**

Разные точки старта

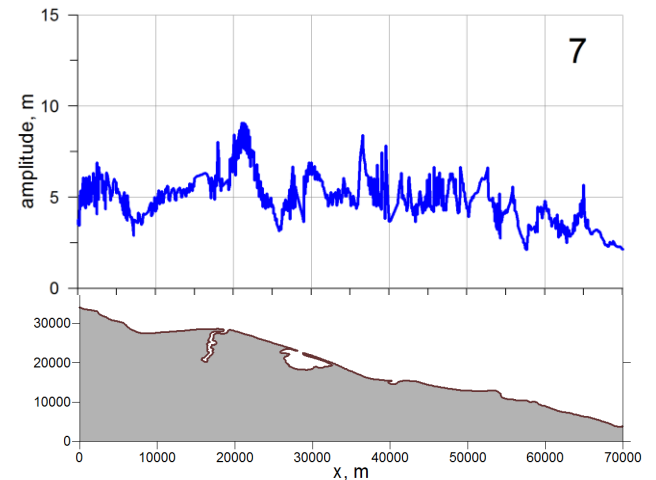
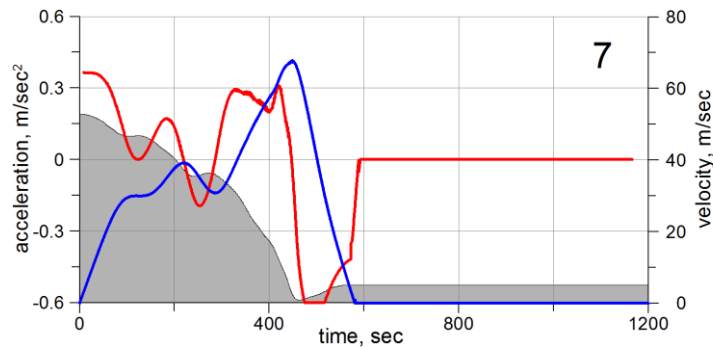
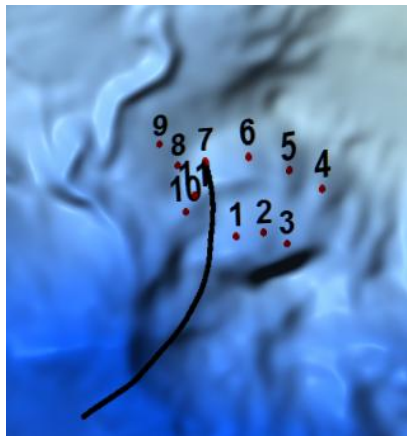
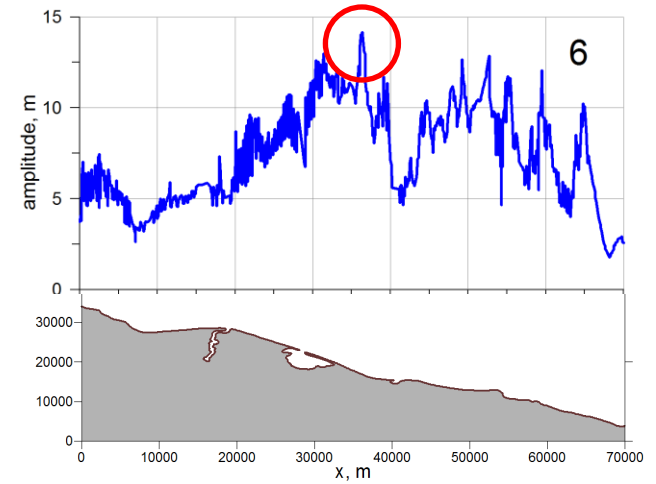
Траектории движения



Графики скорости и ускорения



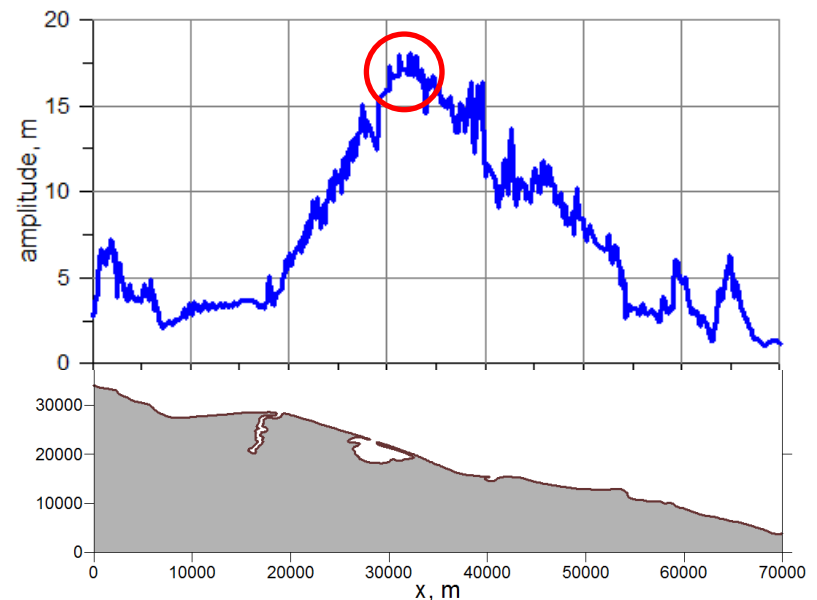
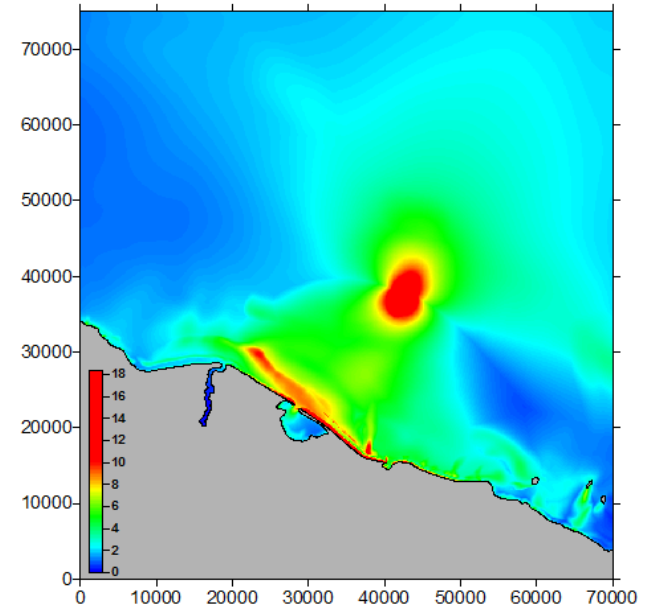
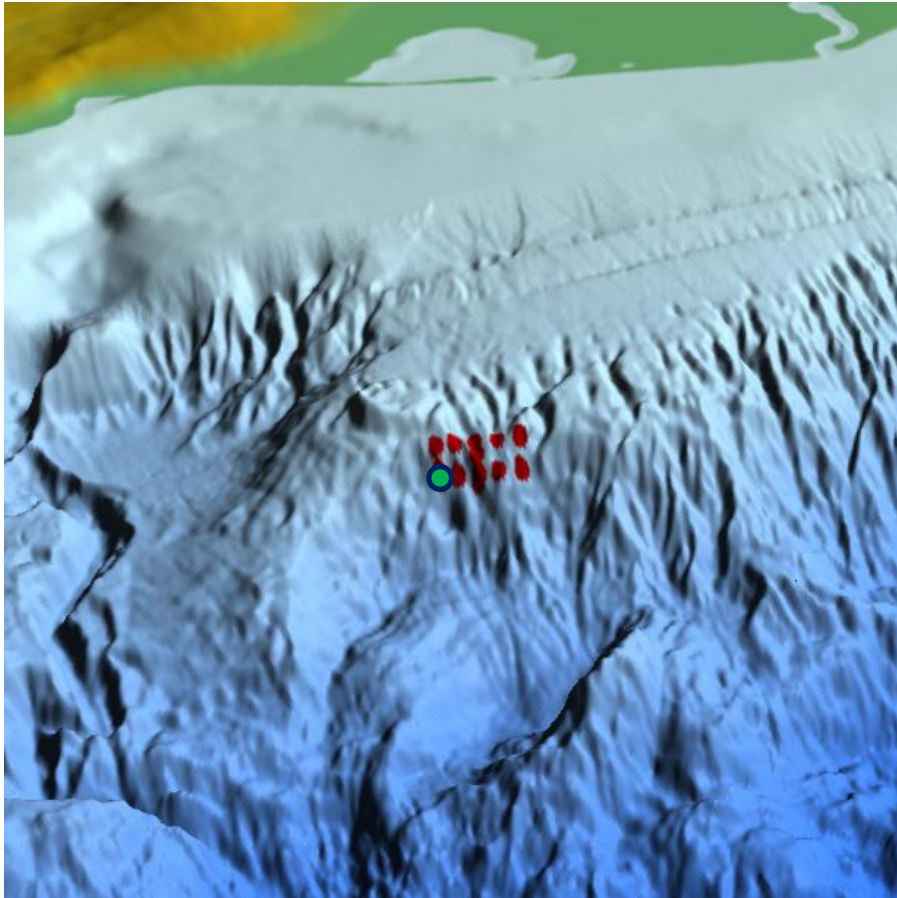
Распределения вдоль побережья



Цунами 17.07.1998 в Папуа-Новой Гвинее

результаты моделирования: **модель квазинедеформируемого тела.**

Уточнение точки старта



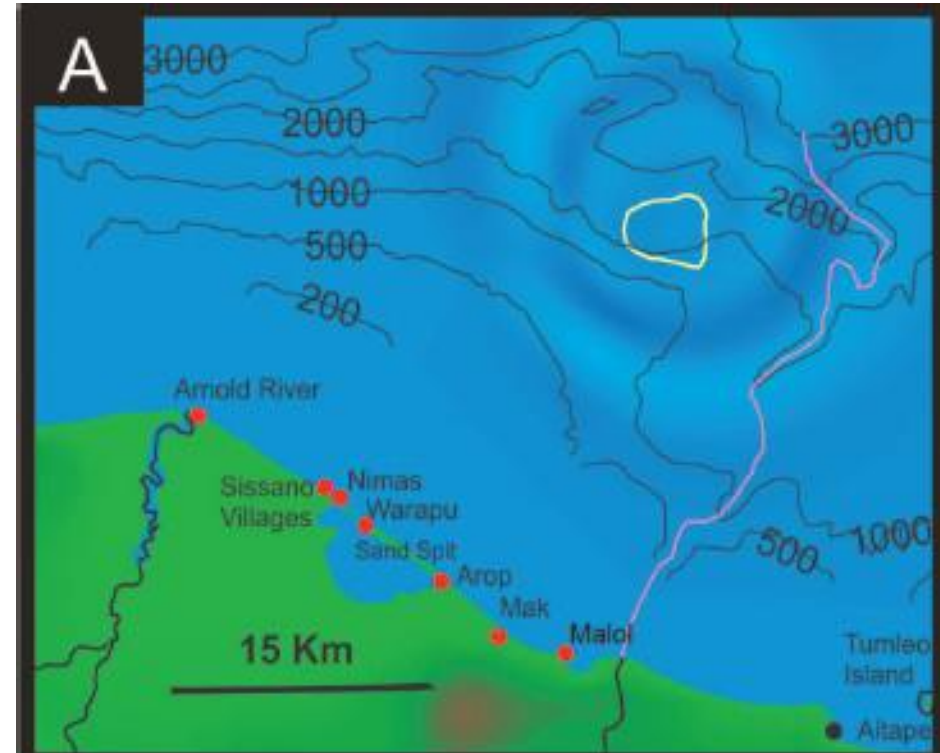
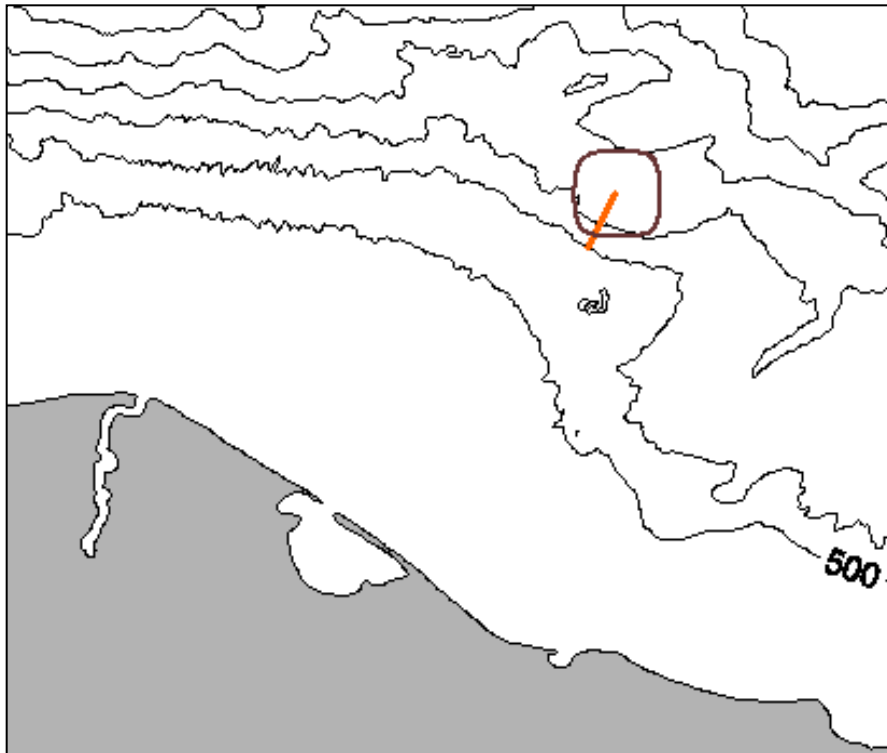
Картина свечения и распределение высот вдоль побережья для левого нижнего начального положения центра масс оползня

Цунами 17.07.1998 в Папуа-Новой Гвинее

результаты моделирования: **модель квазинедеформируемого тела.**

Уточняющий расчет

Траектория движения и контур конечного положения оползня по результатам численных расчетов (слева) и в реальности (справа)



В целом хорошего воспроизведения распределения высот волн вдоль побережья можно добиться в том случае, когда оползень движется и останавливается **несколько западнее** того, что было обнаружено при исследовании дна.