

Численное исследование гипотетических оползневых цунами в Чёрном море

Гусев Олег Игоревич, Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б.

gusev_oleg_igor@mail.ru

Институт вычислительных технологий СО РАН



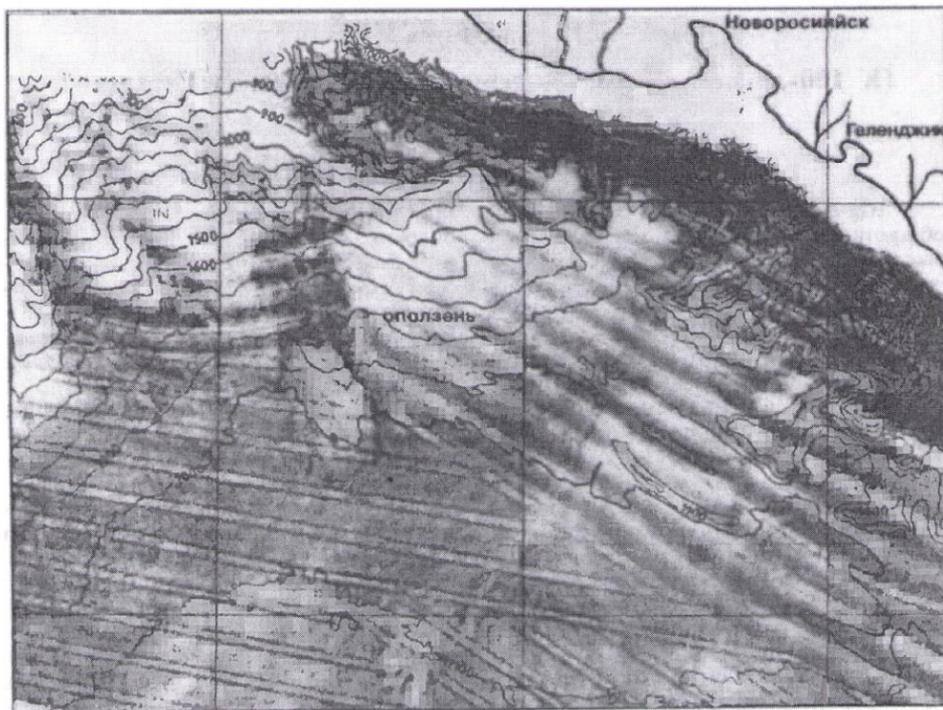
Всероссийская научная конференция
«ВОЛНЫ ЦУНАМИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОНИТОРИНГ, ПРОГНОЗ»
Москва, 17 мая 2019 г.

План доклада

- Обзор задачи 1: исторический подводный оползень вблизи побережья РФ.
- Обзор задачи 2: цунами у берегов Болгарии 7 мая 2007.
- Математические модели и численные алгоритмы.
- Исследование задачи 1.
- Исследование задачи 2.

Исторический подводный оползень вблизи побережья РФ

Казанцев, Р. А. Гигантский оползень на дне Черного моря / Р. А. Казанцев, В. В. Кругляков // Природа. – 1998. – № 10. – С. 86–87.

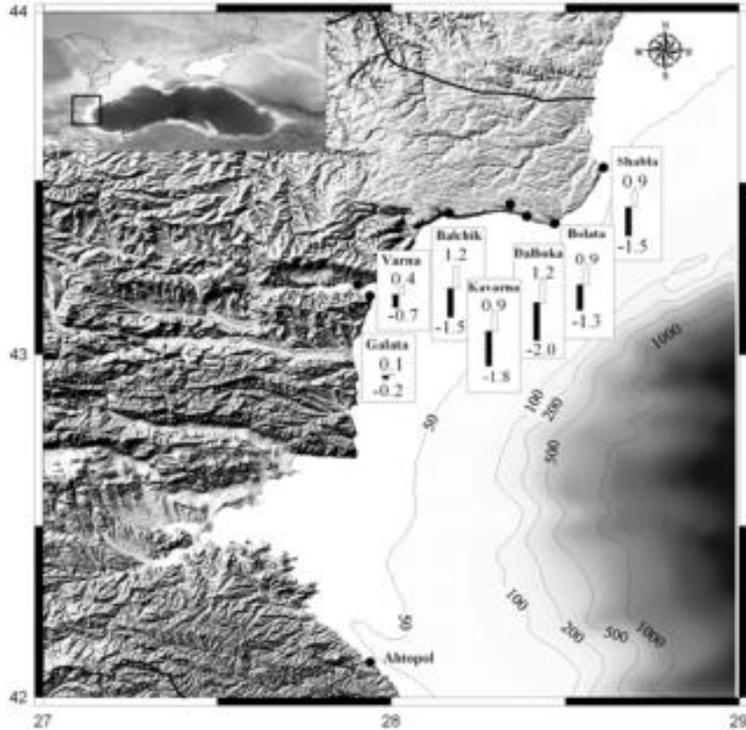


- “Площадь оторвавшегося блока составляет около 200 км²”
- толщина – 200 м
- объём – 40 км³
- переместился почти на 22 км

Какие волны мог породить такой оползень?

Фрагмент карты интенсивности отраженного от дна сигнала, наложенный на батиметрическую схему участка Черного моря. В центре – акустическое изображение гигантского оползня.

Цунами у берегов Болгарии 7 мая 2007

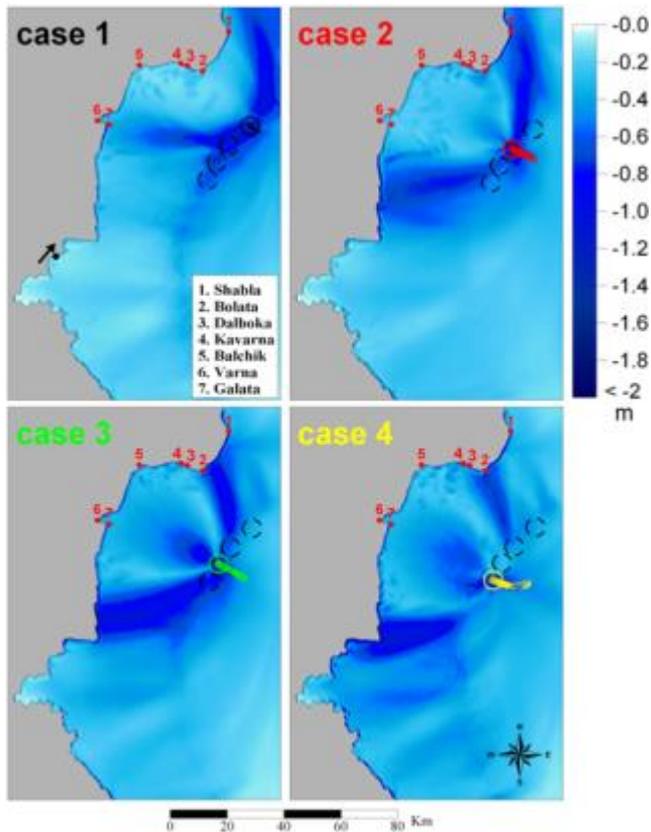


- “The maximum sea level rise and lowering were respectively +1.2 m and 2.0 m”;
- “... no significant earthquakes in the region were recorded on this same day”;
- “The chief period of the oscillations was between 4–8 minutes at most places”.

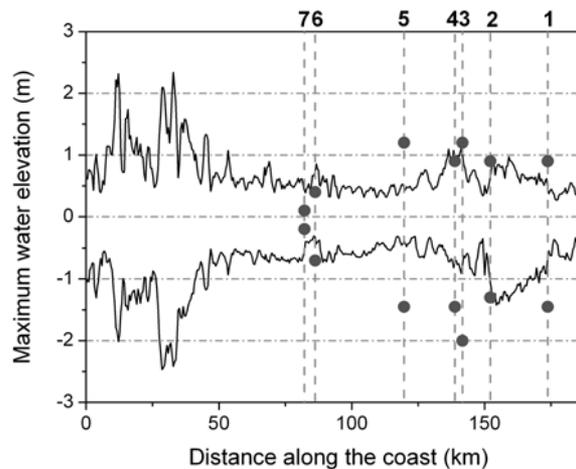
Ranguelov B., Tinti S., Pagnoni G., Tonini R., Zaniboni F., Armigliato A. The nonseismic tsunami observed in the Bulgarian Black Sea on 7 May 2007: was it due to a submarine landslide? // Geophys. Res. Letters, 2008, Vol. 35, L18613.

Цунами у берегов Болгарии 7 мая 2007.

Оползневая гипотеза



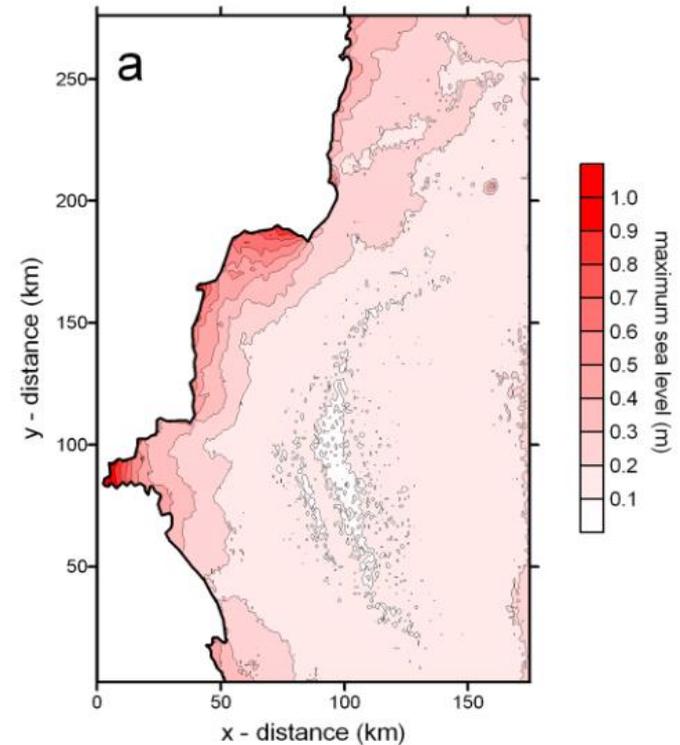
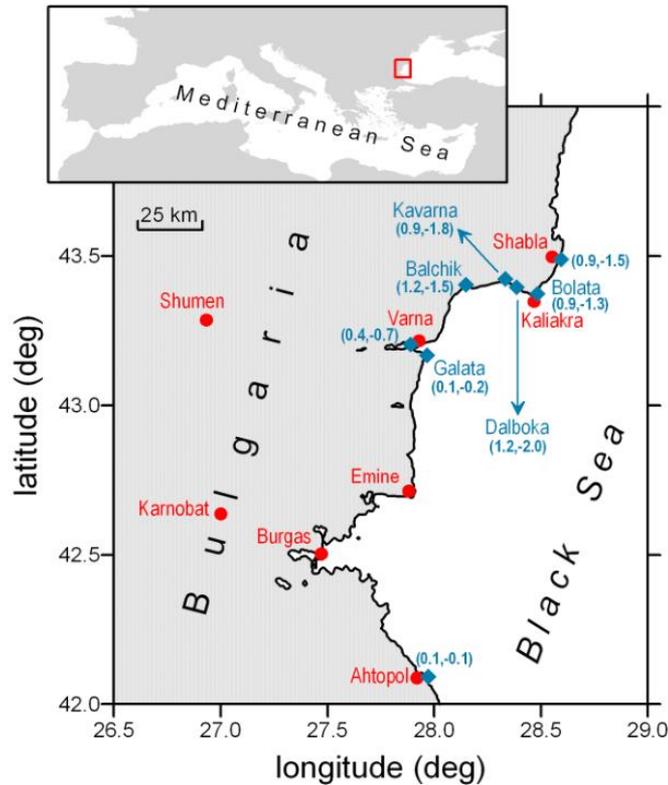
- 4 начальных положения;
- оползень – набор блоков с постоянным объёмом (*Tinti et al. 1997*);
- бездисперсионная модель мелкой воды;
- двухлучевая структура.



- 1 – Shabla
- 2 – Bolata
- 3 – Dalboka
- 4 – Kavarna
- 5 – Balchik
- 6 – Varna
- 7 – Galata

Ranguelov B., Tinti S., Pagnoni G., Tonini R., Zaniboni F., Armigliato A. The nonseismic tsunami observed in the Bulgarian Black Sea on 7 May 2007: was it due to a submarine landslide? // *Geophys. Res. Letters*, 2008, Vol. 35, L18613.

Цунами у берегов Болгарии 7 мая 2007. Гипотеза метеоцунами



Vilibic, I., Sepic, J., Rangelov, B., Mahovic, N.S. & Tinti, S. 2010. Possible atmospheric origin of the 7 May 2007 western Black Sea shelf tsunami event. *Journal of Geophysical Research*, 115, C07006.

Мог ли сход какого-то оползня:

- породить наблюдаемые волны
- и при этом **не** породить там, где ничего подобного не наблюдалось?

Если мог, то какова могла быть траектория его движения?

Модель оползня и распространения волн в настоящей работе

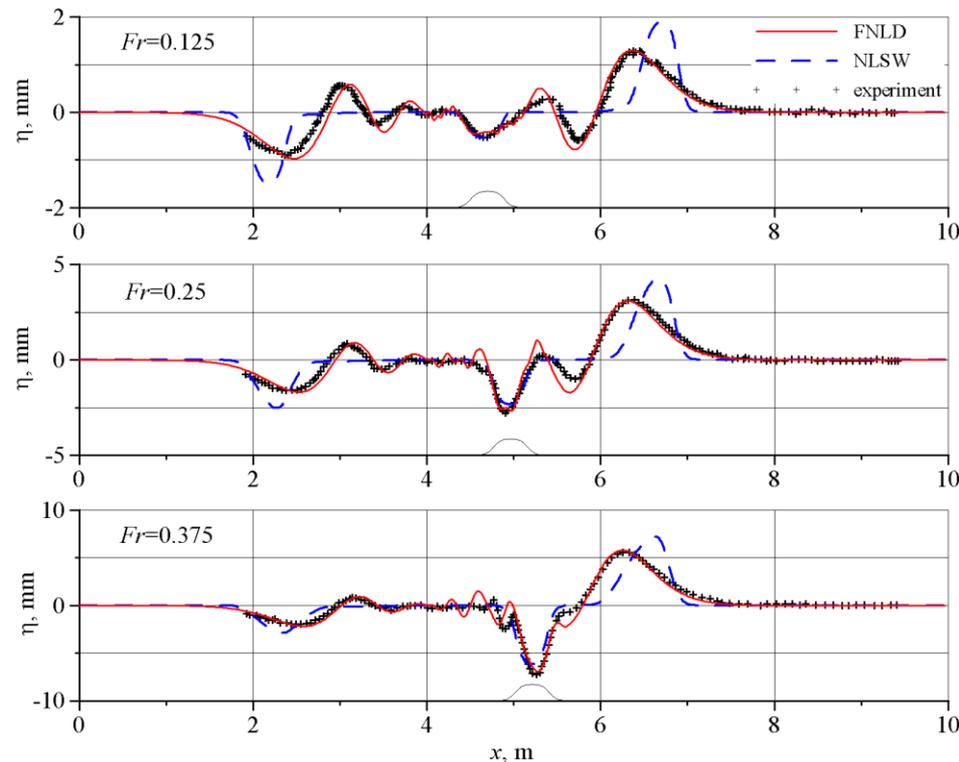
- Модель оползня - квазидеформируемое тело, движущееся по криволинейной поверхности под действием сил тяжести, плавучести, трения о дно и сопротивления воды (*Хакимзянов и Шокина 2012*).
- Полностью нелинейная **дисперсионная** (FNLD) модель мелкой воды второго приближения на вращающейся сфере с учётом подвижности дна.
- Разработанный численный алгоритм, основанный на выделении эллиптической и гиперболической подзадачи в исходной системе FNLD уравнений.

Khakimzyanov G., Dutykh D., Gusev O. Dispersive shallow water wave modelling. Part IV: Numerical simulation on a globally spherical geometry // *Communications in Computational Physics*. 2018. – Vol. 23, No 2. – P. 361–407.

Валидация модели.

Оползень на ровном дне. Сравнение с экспериментом.

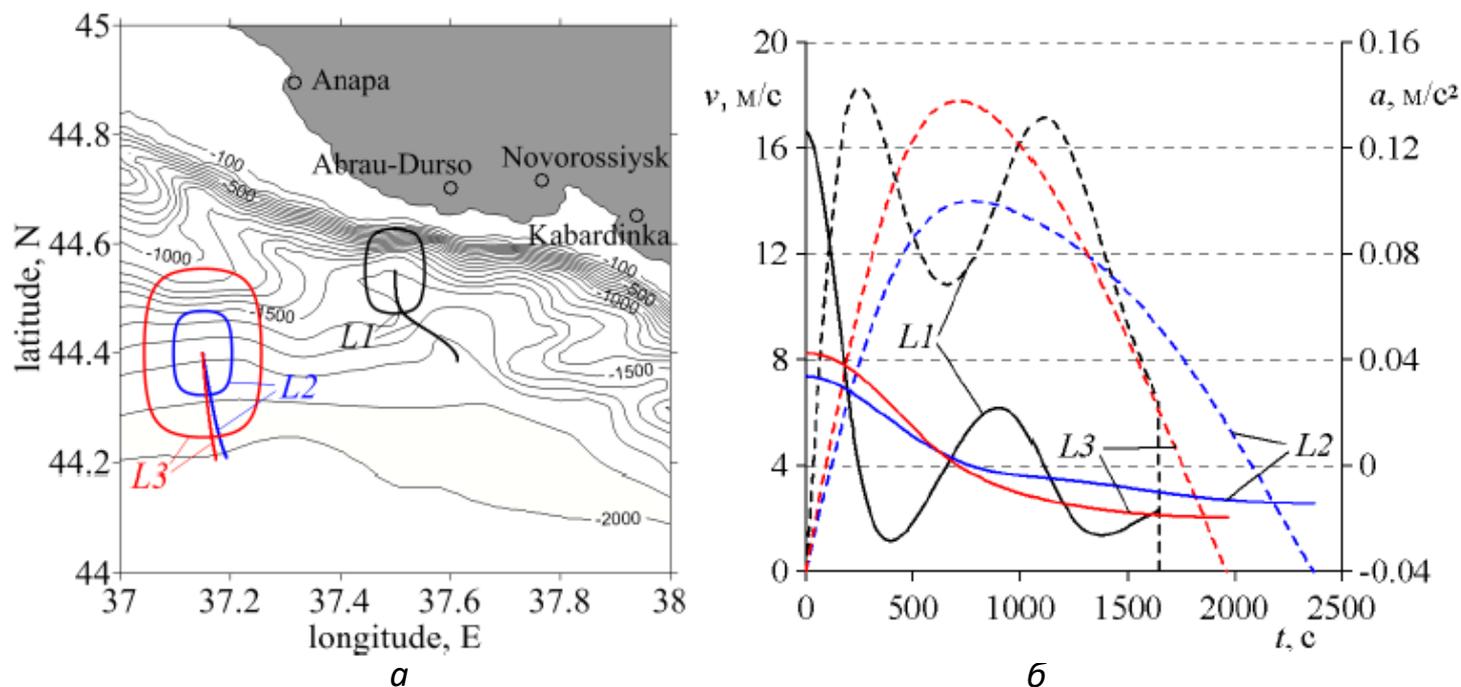
Whittaker, C., Nokes, R. & Davidson, M. Tsunami forcing by a low Froude number landslide // Environmental Fluid Mechanics. – 2015. – Vol. 15. – P. 1215–1239.



Свободные поверхности жидкости в момент времени $t=1.8$ с, полученные с помощью полной НЛД-модели (красные линии) и классической модели мелкой воды (синие линии), а также в экспериментах [Whittaker et al. 2015] (чёрные крестики) в задаче о генерации волн движением подводного оползня по ровному дну

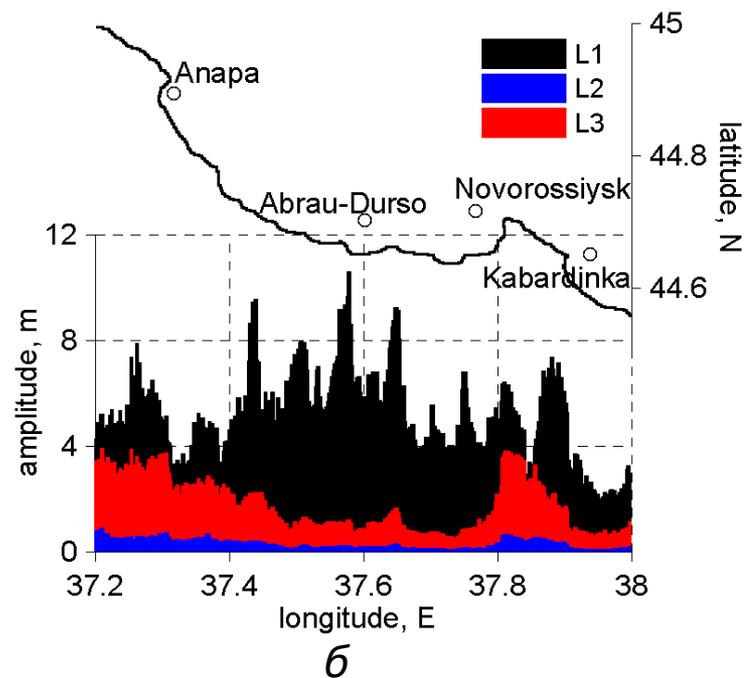
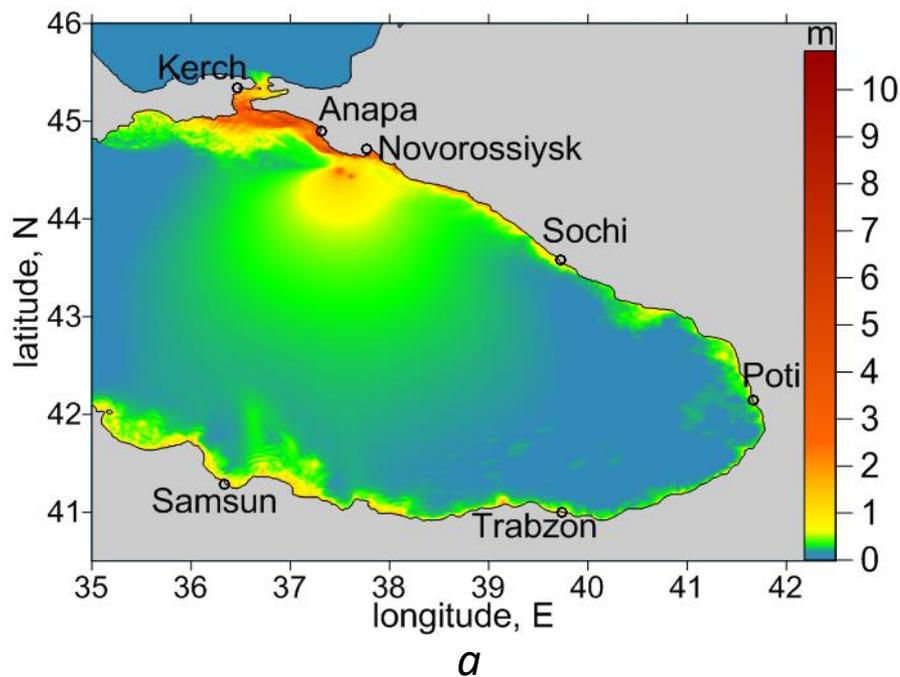
Исторический подводный оползень в Чёрном море

Казанцев, Р. А. Гигантский оползень на дне Черного моря / Р. А. Казанцев, В. В. Кругляков // Природа. – 1998. – № 10. – С. 86–87.



a — схема фрагмента расчетной акватории с нанесенными изолиниями рельефа дна, контурами модельных оползней и траекториями их движения; *b* — графики скоростей v (штриховые линии) и ускорений a (сплошные линии) центров масс модельных оползней

Исторический подводный оползень в Чёрном море



a — распределение максимальных амплитуд волн цунами, порожденных модельным оползнем L1 и рассчитанных на 3 часа физического времени их распространения; ***б*** — распределение максимальных высот волн вдоль участка береговой линии

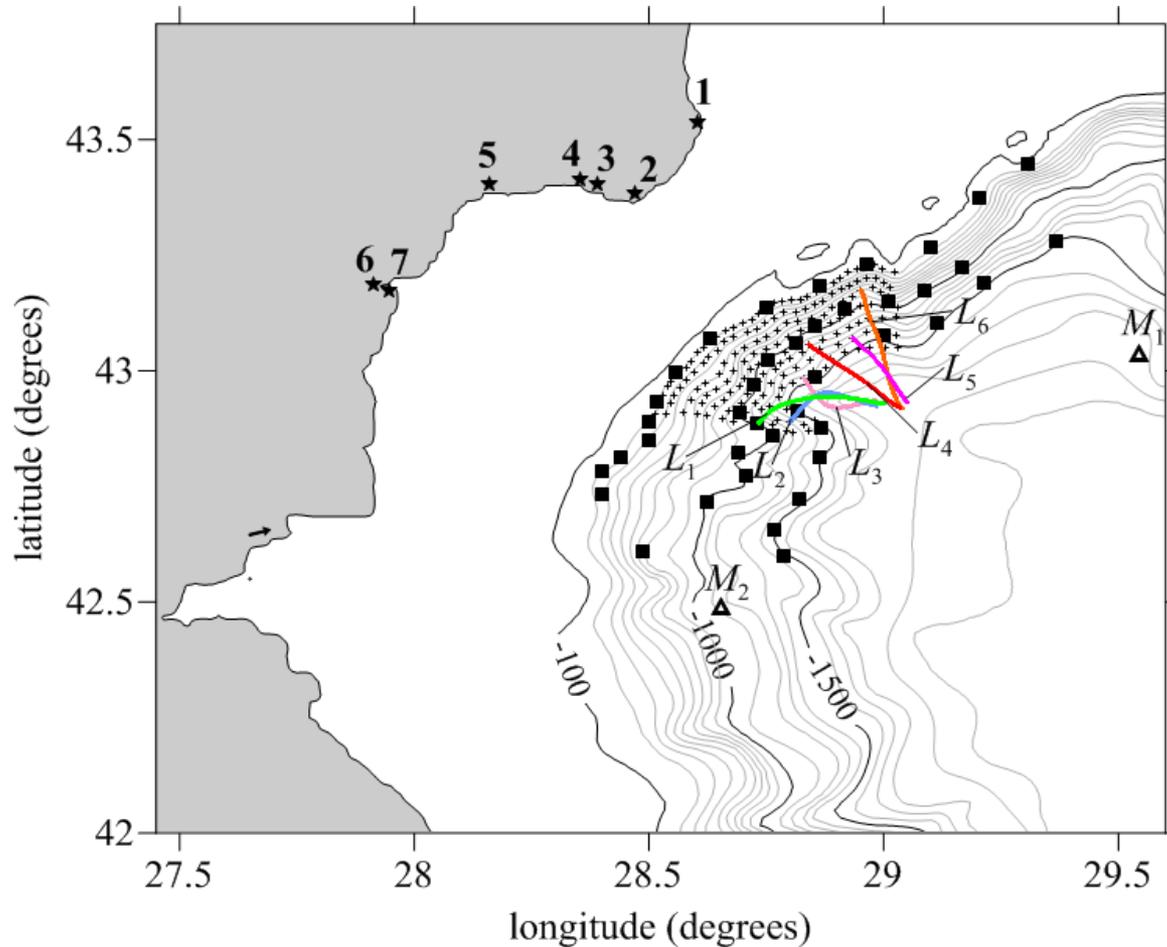
Khakimzyanov, G. S. Modelling of tsunami generated by submarine landslides in the Black Sea / G. S. Khakimzyanov, O. I. Gusev, S. A. Beisel, L. B. Chubarov, N. Yu. Shokina // RJNAMM. – 2015. – Vol. 30, No. 4. – P. 227–237.

Исследование гипотезы об оползневом механизме образования цунами в Болгарии 07.05.2007

Общая концепция:

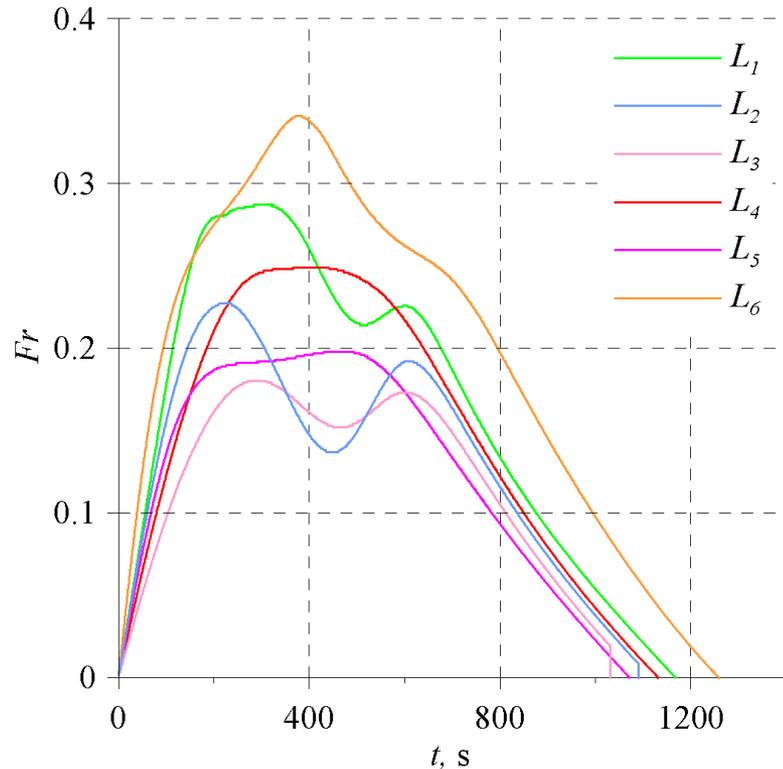
1. Выбор модельного оползня: длина и ширина 5 км, толщина 40 м.
2. Сценарные расчёты образования волн с перебором начальных положений оползня.
3. Поиск наиболее «перспективных» начальных положений.
4. Расчёты с наиболее «подходящими» оползнями, начинающих своё движение с этих положений.

Исследование гипотезы об оползневом механизме образования цунами в Болгарии 07.05.2007

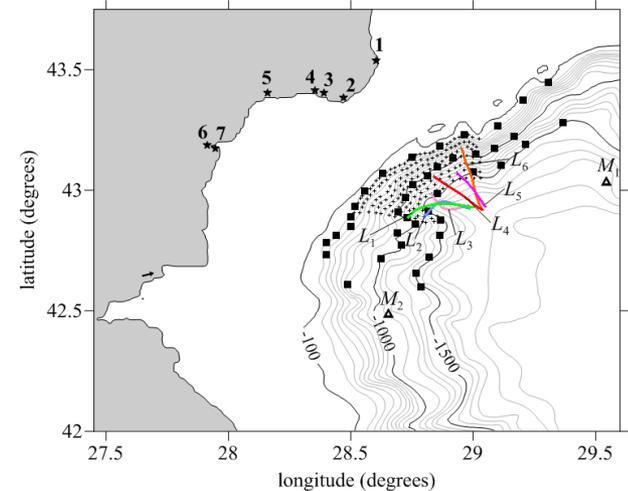


Расчётная область и расположение исследованных начальных положений оползня. Линии $L1-L6$ – траектории схода наиболее «подходящих» оползней

Исследование гипотезы об оползневом механизме образования цунами в Болгарии 07.05.2007



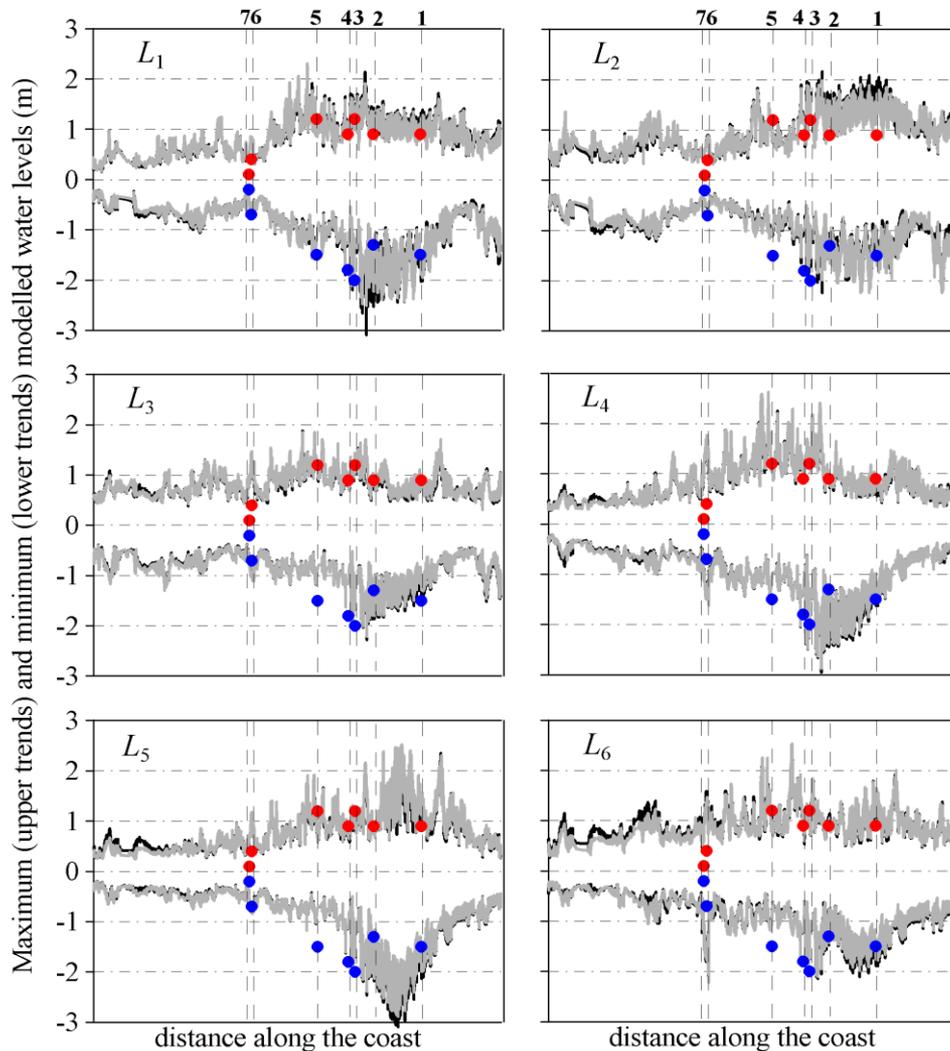
Локальные числа Фруда



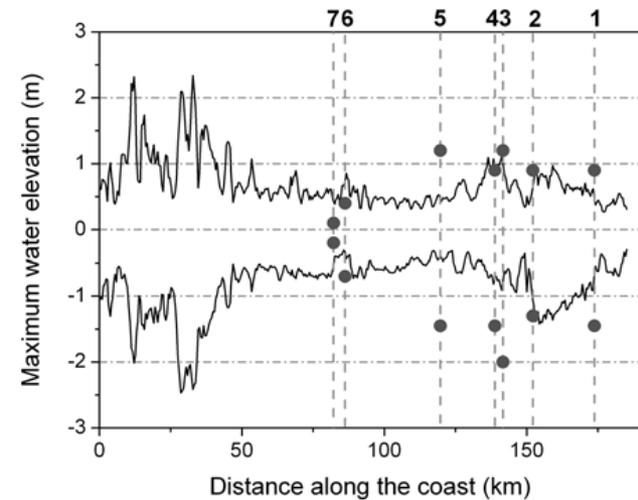
Координаты начальных позиций, толщины и заглубления оползней L_1 - L_6

Name	Longitude (degrees)	Latitude (degrees)	T (m)	Initial depth (m)
L_1	28.7342	42.8871	110	1024
L_2	28.8003	42.8898	200	1323
L_3	28.8306	42.9835	320	1429
L_4	28.8416	43.0551	280	1178
L_5	28.9353	43.0689	300	1385
L_6	28.9517	43.1735	110	811

Исследование гипотезы об оползневом механизме образования цунами в Болгарии 07.05.2007

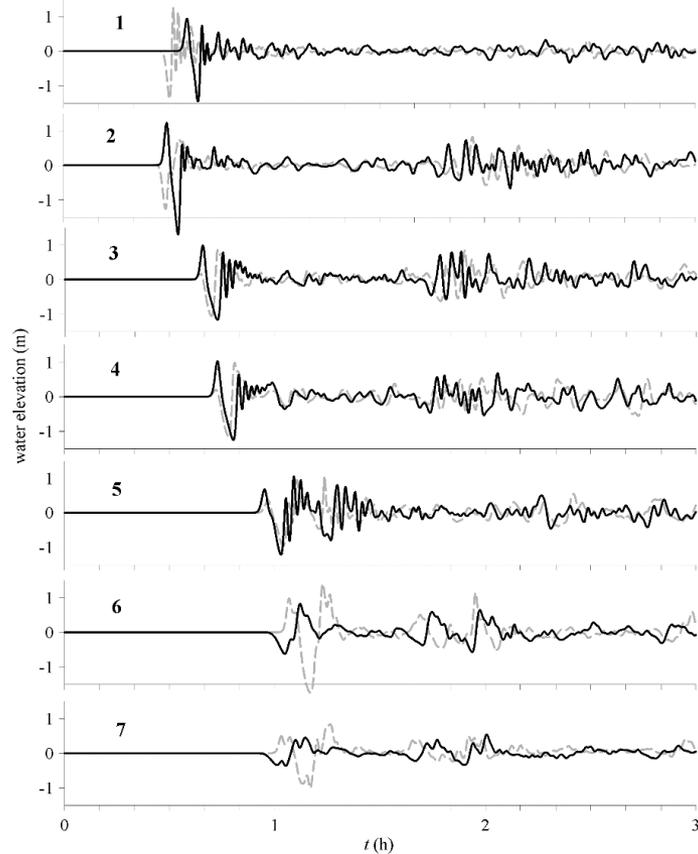


Rangelov et al. 2008

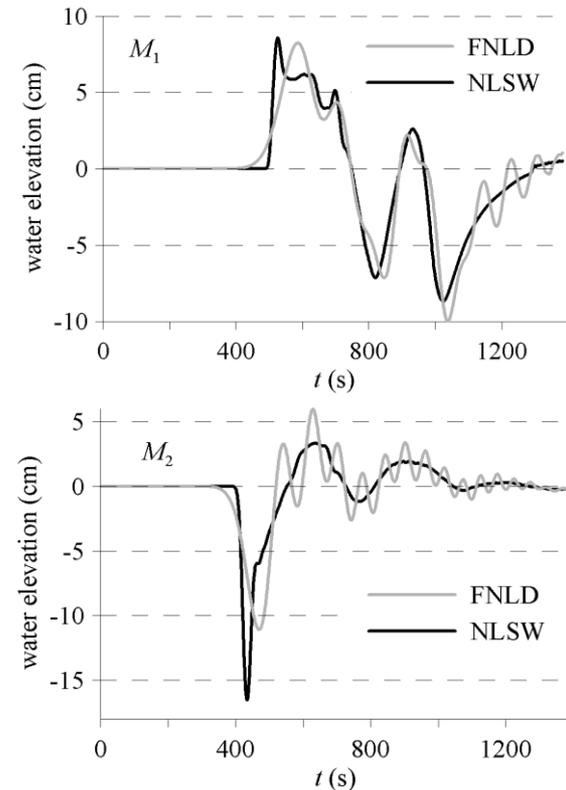


Распределение заплеска вдоль берега

Исследование гипотезы об оползневом механизме образования цунами в Болгарии 07.05.2007



Мареограммы в расчётах с оползнями $L1$ (чёрные линии) и $L5$ (серые линии)



Проявление дисперсии в глубоководных мареографах в расчёте с оползнем $L1$

Gusev O.I., Khakimzyanov G.S. & Chubarov L.B. Bulgarian tsunami on 7 May 2007: numerical investigation of the hypothesis of a submarine-landslide origin // in: Lintern, D. G. et al. (eds). Subaqueous Mass Movements. Geological Society, London, Special Publications, 2018, 477, <https://doi.org/10.1144/SP477.6>

Заключение

1. Исторический оползень мог породить волны высотой до 4 м
 2. Замечено сильное влияние начального положения оползня на процесс волнообразования
-
1. Рассмотрено более 200 начальных положений модельного оползня
 2. выделено 6 модельных (групп) оползней, порождавших близкие к натурным данным волны
 3. все такие оползни останавливаются приблизительно в одном месте

Зафиксированные оползневые образования в Чёрном море

Есина, Л. А. Оползневые процессы на материковом склоне северо-восточной части Чёрного моря / Л. А. Есина, Ю. Д. Евсюков, А. Б. Хворощ // Вестник южного научного центра РАН. Науки о Земле. – 2011. – Т. 7, № 3. – С. 61–68.

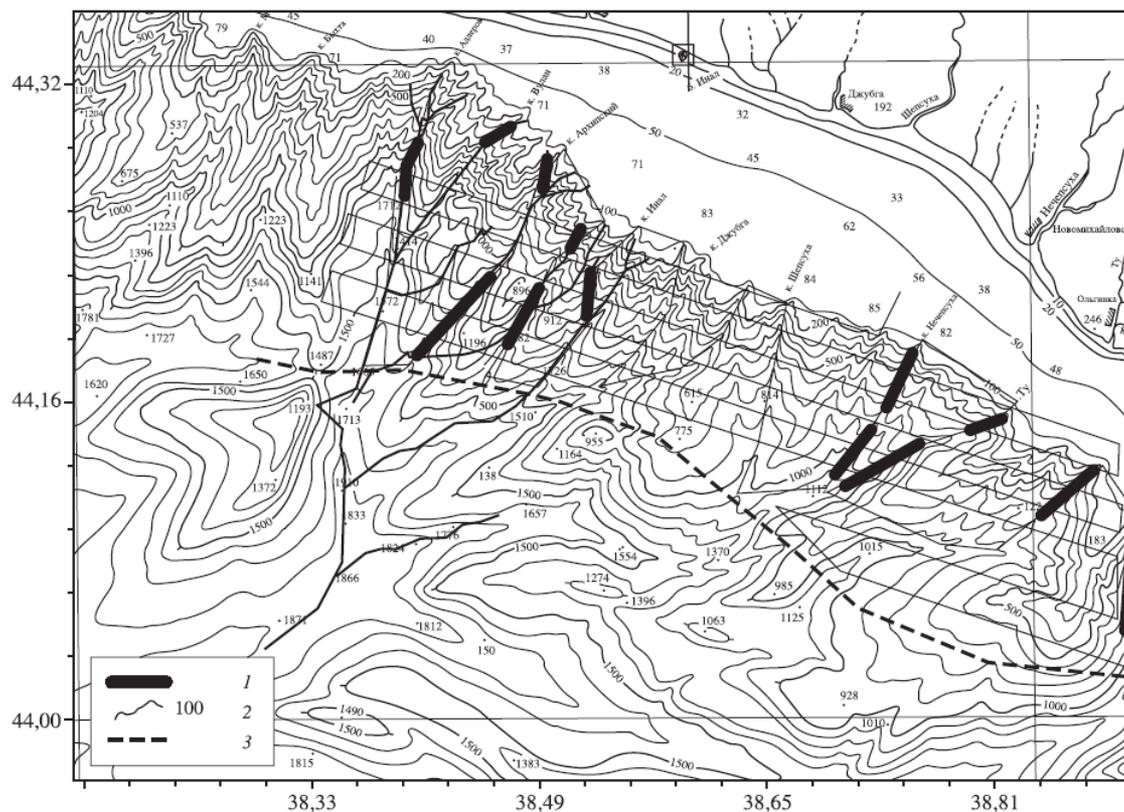


Рис. 6. Схема расположения оползневых образований. 1 – крупные оползни в каньонах материкового склона; 2 – изобаты, м; 3 – 12-мильная зона

Пример черноморского пляжа РФ



Спасибо за внимание!

Полностью нелинейная дисперсионная модель на вращающейся сфере

$$H_t + \frac{1}{R \sin \theta} \left((Hu)_\lambda + (Hv \sin \theta)_\theta \right) = 0,$$

$$u_t + \frac{1}{R \sin \theta} uu_\lambda + \frac{1}{R} vv_\theta + \frac{1}{R \sin \theta} g\eta_\lambda = \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\varphi_\lambda - \psi h_\lambda}{H} - \frac{uv}{R} \operatorname{ctg} \theta - fv,$$

$$v_t + \frac{1}{R \sin \theta} uv_\lambda + \frac{1}{R} vv_\theta + \frac{1}{R} g\eta_\theta = \frac{1}{R} \frac{\varphi_\theta - \psi h_\theta}{H} + \frac{u^2}{R} \operatorname{ctg} \theta + fu + \Omega^2 R \sin \theta \cos \theta$$

- Обозначения:
- λ, θ - долгота и дополнение до широты;
 - R - радиус сферы (Земли); Ω - угловая скорость;
 - $\vec{u} = (u, v) = (R\dot{\lambda} \sin \theta, R\dot{\theta})$ - вектор линейной скорости;
 - $H = h + \eta$ - полная толщина слоя жидкости;
 - $r = R + \eta$ - уравнение свободной поверхности;
 - $r = R - h$ - уравнение батиметрии (известное);
 - $f = 2\Omega \cos \theta$ - параметр Кориолиса.

Khakimzyanov G., Dutykh D., Gusev O. Dispersive shallow water wave modelling. Part IV: Numerical simulation on a globally spherical geometry // *Communications in Computational Physics*. 2018. – Vol. 23, No 2. – P. 361–407.

Выделение подзадачи для φ в упрощённой постановке

$$\varphi = \frac{H^3}{3} Q_1 + \frac{H^2}{2} Q_2, \quad \psi = \frac{H^2}{2} Q_1 + H Q_2,$$

где $Q_1 = D(\nabla \cdot \vec{c}) - (\nabla \cdot \vec{c})^2$, $Q_2 = D^2 h$, $\vec{c} = (\dot{\lambda}, \dot{\theta})$, $D = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{c} \cdot \nabla$.

Одномерные линеаризованные уравнения в акватории с постоянной глубиной h_0 :

$$\begin{aligned} \eta_t + h_0 u_x &= 0, \\ u_t + g \eta_x &= \frac{h_0^2}{3} u_{xxt}. \end{aligned}$$

Обозначим $\varphi = \frac{h_0^3}{3} u_{xt}$  $u_t + g \eta_x = \frac{\varphi_x}{h_0}$  $\varphi_{xx} - \frac{3}{h_0^2} \varphi = g h_0 \eta_{xx}$

$$\begin{cases} \eta_t + h_0 u_x = 0, \\ u_t + g \eta_x = \frac{\varphi_x}{h_0} \end{cases}$$

Эллиптическое уравнение в FNLD-модели на вращающейся сфере

$$\frac{1}{\sin \theta} \left(\frac{\varphi_\lambda}{H} - \frac{h_\lambda}{H} \frac{\nabla h \cdot \nabla \varphi}{\tilde{r}} \right)_\lambda + \left(\frac{\varphi_\theta}{H} - \left(\frac{h_\theta}{H} \frac{\nabla h \cdot \nabla \varphi}{\tilde{r}} \right) \sin \theta \right)_\theta -$$

$$- 6\varphi \left(\frac{1}{\sin \theta} \left(\frac{h_\lambda}{H^2 \tilde{r}} \right)_\lambda + \left(\frac{h_\theta}{H^2 \tilde{r}} \sin \theta \right)_\theta + \frac{2}{H^3} \frac{\tilde{r} - 3}{\tilde{r}} R^2 \sin \theta \right) = F,$$

$$\psi = \frac{\nabla \varphi \cdot \nabla h}{\tilde{r}} + QH + \frac{6\varphi}{H\tilde{r}},$$

где

$$F = R^2 \sin \theta \left[\nabla \cdot \left(Q \nabla h + g \nabla \eta - \vec{a} \right) - \frac{6}{H} Q \right] + v^2 \sin \theta - 2v v_\theta \cos \theta - 2ctg \theta (uv)_\lambda + 2 \left[\frac{1}{\sin \theta} (u_\lambda + v_\theta \sin \theta + v \cos \theta)^2 - (u_\lambda v_\theta - u_\theta v_\lambda) \right],$$

$$Q = -g \nabla \eta \cdot \nabla h \left(\Omega + \frac{u}{R \sin \theta} \right) + \frac{1}{R^2 \sin \theta} \left(\frac{u^2}{\sin \theta} h_{\lambda\lambda} + 2uv h_{\lambda\theta} + v^2 h_{\theta\theta} \sin \theta \right) + B + \vec{a} \cdot \nabla h,$$

$$\vec{a} = \left(\Omega + \frac{u}{R \sin \theta} \right) R^2 \sin \theta \cos \theta \begin{pmatrix} -2v/R \\ \Omega + \frac{u}{R \sin \theta} \end{pmatrix}, \quad B = h_u + 2 \left(\frac{u}{R \sin \theta} h_{\lambda\lambda} + \frac{v}{R} h_{\theta\theta} \right),$$

Моделирование схода подводного оползня

Khakimzyanov, G. S. Evaluation of the height of waves generated by an underwater landslide in a confined water reservoir / G. S. Khakimzyanov, N. Yu. Shokina // J. Appl. Mech. Tech. Phys. – 2012. – Vol. 53, No. 5. – P. 690–699.

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

- квазидеформируемое тело;
- при расчёте оползень отождествляется с материальной точкой, движущейся по криволинейной поверхности;
- в качестве сил, действующей на эту точку, используется интегральная сумма сил, действующих на элементарные объёмы оползня.

$$h_{sl}(x, y, 0) = \begin{cases} \frac{T}{4} \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi(x-x_c^0)}{b_x}\right) \right) \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi(y-y_c^0)}{b_y}\right) \right), & \text{если } |x-x_c^0| \leq b_x \text{ и } |y-y_c^0| \leq b_y; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Параметры: $\gamma = \rho_{sl} / \rho_w > 1$ - отношение плотности оползня к плотности воды;
 C_d - коэффициент гидродинамического сопротивления;
 $C_f = tg\theta^*$ - коэффициент трения о дно;
 C_w - коэффициент присоединённой массы;
 T - толщина оползня, b_x и b_y - его протяжённость .