

## **Электротомография на постоянном токе как инструмент оперативного определения дальности заплеска цунами при отсутствии его геоморфологических признаков**

**Панин Г.Л.<sup>1</sup>, Котенко Т.А.<sup>2</sup>, Балков Е.В.<sup>1</sup>, Котенко Л.В.<sup>2</sup>**

### **Electrical resistivity tomography as a tool to record runup of a tsunami in the absence of its geomorphological features**

**Panin G.L., Kotenko T.A., Balkov E.V., Kotenko L.V.**

<sup>1</sup> *Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск;*

*e-mail: ra9odd@gmail.com*

<sup>2</sup> *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;*

*e-mail: sinarka2017@mail.ru*

Обсуждается возможность определения глубины заплеска цунами методом электротомографии на постоянном токе при отсутствии поверхностных следов цунами. Высокая соленость морской воды (33-36 г/л) после ее фильтрации в грунт определяет его ионную проводимость и контрастно низкое электрическое сопротивление.

### **Введение**

Традиционные полевые методы обследования берегов, подвергшихся воздействию цунами, заключаются в обнаружении характерных геоморфологических признаков, детально описанных, например, в [4]. Однако возможны ситуации, когда при невысокой волне, воздействие которой имеет характер подтопления территории, отсутствуют эрозия почвы, выносной мусор (плавник, пластик, морская трава и т.д.), и даже не наблюдается полегание травостоя. Последнее наблюдалось авторами на некоторых приморских террасах о-вов Парамушир и Шумшу после цунами 30 июля 2025 г. Некоторые растения галофиты (осока, колосняк, мертензия и др.) способны усваивать морскую воду [1]. Поэтому не наблюдается и их последующее отмирание (визуально – почернение). Однако заплеск цунами на территорию, не затапливаемую приливами в обычных условиях, в результате интенсивного просачивания в период воздействия цунами может формировать подповерхностные линзы с морской водой. В этих случаях высокая соленость морской воды (33-36 г/л) будет некоторое время определять ионную проводимость этих грунтов и, соответственно, низкое удельное электрическое сопротивление УЭС ( $\geq 0.1$  Ом·м), благодаря чему в течение некоторого времени может сохраняться возможность визуализации заплеска даже при отсутствии поверхностных следов цунами.

Задача данного исследования состояла в изучении возможности применения для этих целей электротомографии на постоянном токе. Работа проводилась 9-15 августа 2025 г. по следам цунами 30 июля 2025 г. на о. Парамушир, Курильские острова.

### **Методы исследований**

Электротомография (ЭТ) выполнялась с использованием аппаратуры электротомографии Скала-48 и электроразведочного кабеля с 24 электродами. Шаг между электродами составлял 2 м, что обеспечивало глубинность ~10 м. Было выбрано использование установки Шлюмберже. Топография вдоль всех профилей строилась с помощью GPS-навигатора. Для обработки полевых данных и моделирования использовались пакеты программ Res2Dinv и Res2Dmod.

Электрические свойства влажного песка определяются ионной проводимостью насыщающего его раствора и зависят от минерализации раствора. В таблице приведены авторские данные о минерализации природных вод района исследования и характерные для них величины УЭС. Формула расчета УЭС для свободных подземных вод по [2]:

$$\rho = 8.4 / M,$$

где  $\rho$  – УЭС, Ом·м; M – общая минерализация, г/л.

Таблица. Региональные природные воды и их характеристики

Тип вод	М, мг/л	УЭС, Ом·м
Дождь	10-28	300-840
Поверхностные воды	150-280	30-56
Подземные воды	102-108	80
Морская вода	35000	0.2

В работе [3] показана модель проникновения соленой воды в прибрежную часть суши. В нашем случае этой моделью можно воспользоваться для оценки распределения УЭС в береговой части до прихода цунами.

### Результаты исследования и их обсуждение

Были выбраны два участка с четкими границами заплеска на берегу Второго Курильского пролива (рис. 1а). Затем выполнен один профиль П1 параллельно урезу воды и профиль П2 перпендикулярно береговой линии. Профиль П2 был протянут от уреза воды (рис. 1б).

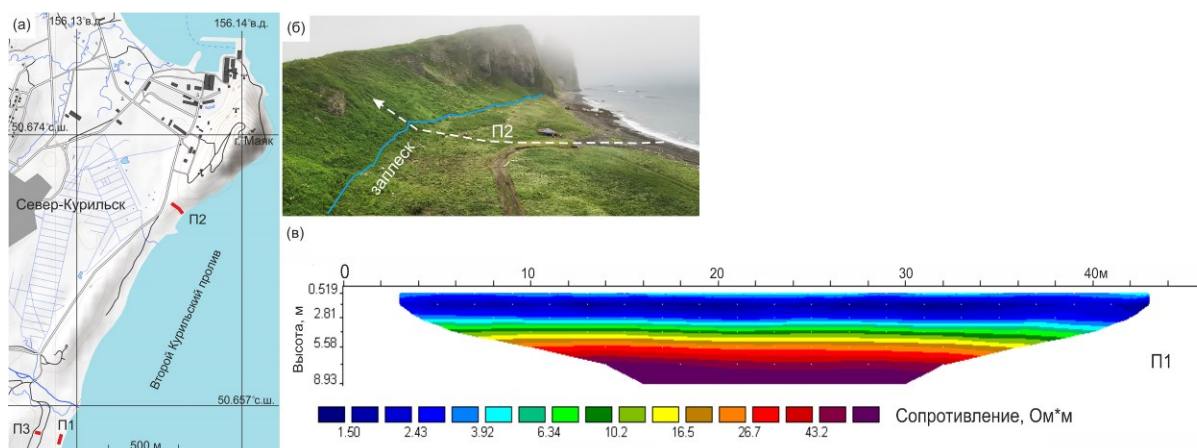


Рис. 1. Район проведения работ и профили ЭТ (а). Профиль П2 (б). Распределение УЭС по профилю П1 (в).

Профиль П1 располагался в приливной зоне постоянного просачивания морской воды в песчаные отложения (рис. 1в). Распределение УЭС на этом участке характеризуется горизонтально слоистой моделью с увеличением сопротивления с глубиной от 0.3 до 50 Ом·м. Наименьшие сопротивления фиксировались в слое до глубины около 3 м (0-4 Ом·м). Второй профиль П2 был проложен перпендикулярно берегу моря, сначала с небольшим уклоном и в конечной трети пути по крутому склону (рис. 2). Профиль закладывался на 16 м выше границы заплеска. Граница заплеска четко определялась по полеганию травостоя и полосе отложившегося мусора и плавника. В результате было определено наличие подповерхностной линзы (46-54 м) пониженного сопротивления по всей длине профиля ниже границы заплеска, установленной визуально. Толщина линзы составляет несколько метров. Значение кажущегося сопротивления выше характерного для чистой морской воды 0.1-0.3 Ом·м, что связано с проведением измерений через большой промежуток времени после цунами – более месяца. Кроме того, за этот период выпало 345 мм осадков ([www.pogodaiklimat.ru](http://www.pogodaiklimat.ru)), что неизбежно повлекло разбавление морских вод. В данных условиях не приходится ожидать абсолютного совпадения верхней границы заплеска и границы области в УЭС. Но мы ожидаем более точный результат при оперативном измерении заплеска методом ЭТ благодаря контрастно низкому УЭС для грунта, насыщенного неразбавленной морской водой. Для увеличения пространственного разрешения можно уменьшить шаг между электродами.

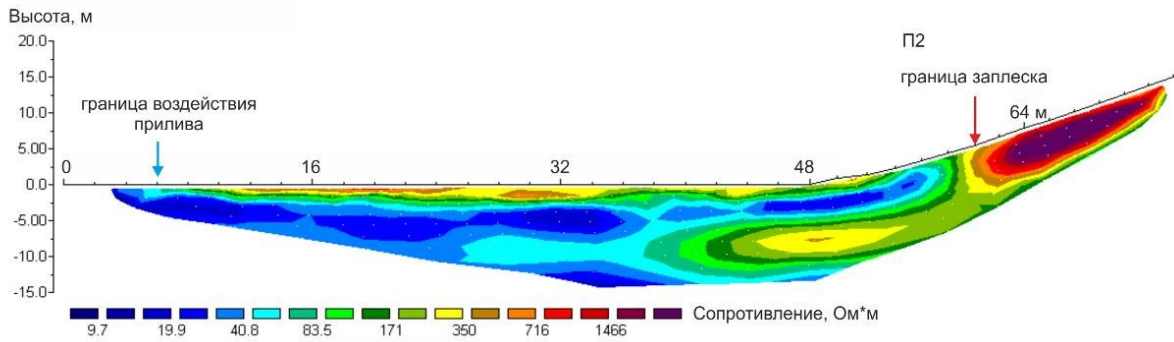


Рис. 2. Инверсия по профилю П2. Указаны границы заплеска и приливной зоны, установленные по геоморфологическим признакам на поверхности. Длина косы дана с 16-го метра (урез моря), на котором был установлен первый электрод.

### Моделирование

Моделирование было выполнено для участка расположения профиля П2. Выклинивание низкоомного горизонта в менее проводящую среду является характерным признаком проникновения соленой воды в прибрежную часть [3]. Форма клина обусловлена разностью осмотических и гидростатических сил. Можно построить модель прибрежной части, используя размеры профиля П2 и референтные значения для соленых горизонтов профиля П1. В этом случае модель содержит минимум три слоя: клин проводящего горизонта со стороны моря, переходную зону на переднем фронте клина и высокоомный прибрежный слой (рис. 3а).

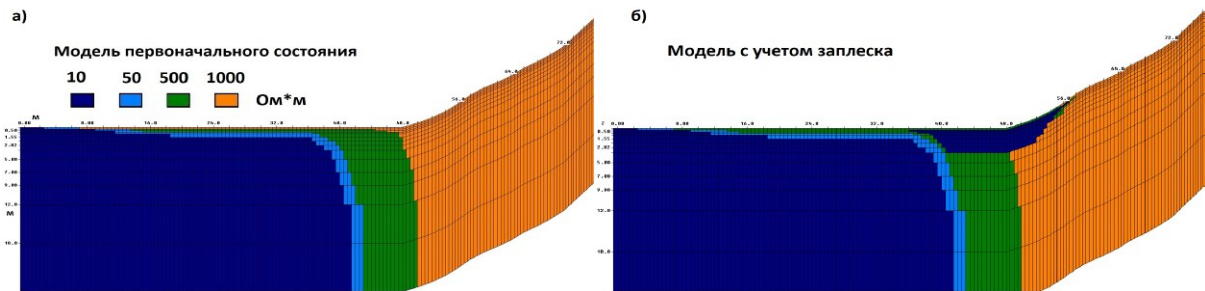


Рис. 3. Четырехслойная модель проникновения соленой воды в прибрежную часть до прихода цунами (а) и после прихода (б). 50 и 500 Ом\*м – переходной слой.

Для такой модели первоначального состояния инверсия данных, полученных решением прямой задачи, будет выглядеть как на рис. 4. Логично предположить, что заплеск цунами на дневную поверхность приведет к последующей фильтрации соленой воды вниз, и модель можно расширить, добавив зону заплеска, как на рис. 3б.

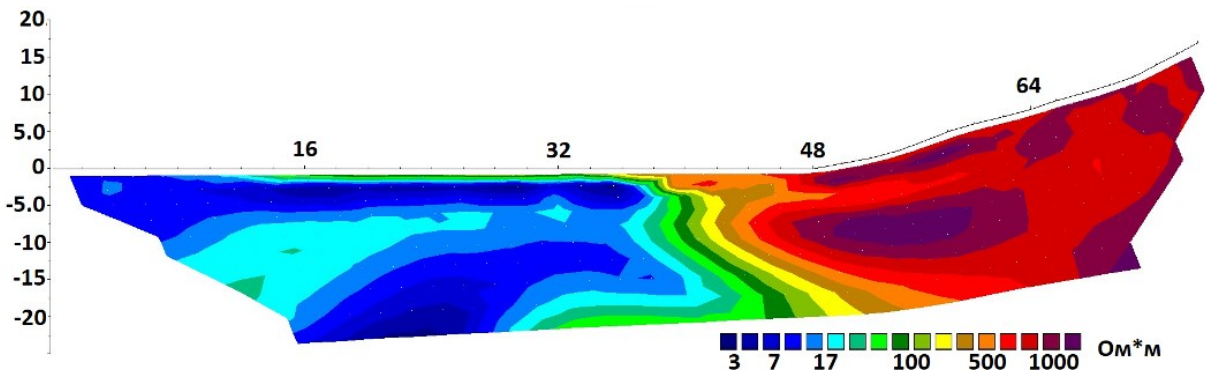


Рис. 4. Результат инверсии данных, полученных решением прямой задачи, для модели первоначального состояния прибрежной зоны.

Картина распределения УЭС в случае заплеска по результатам инверсии данных, полученных при решении прямой задачи, показана на геоэлектрическом разрезе на рис. 5. Положение границы расчетного заплеска (в районе отметки 56 м) хорошо видно в распределении УЭС.

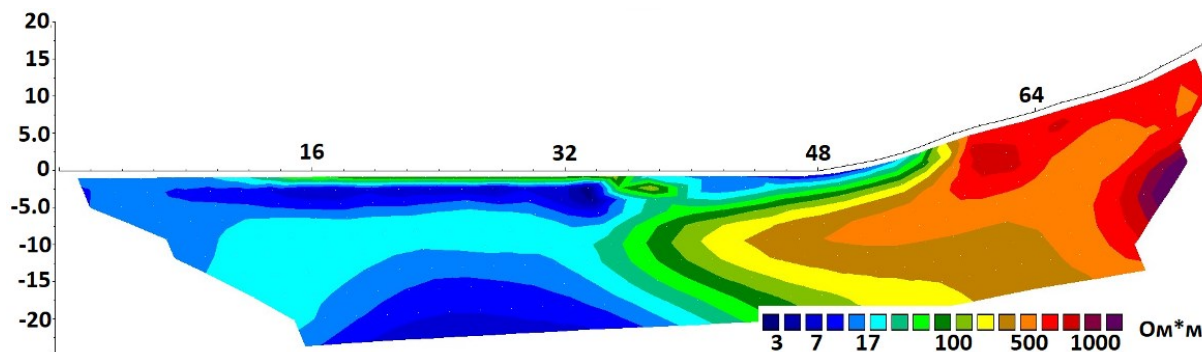


Рис. 5. Результат инверсии данных распределения УЭС для заплеска цунами.

### Выводы

Результаты анализа двух разрезов удельного электрического сопротивления среды в подповерхностном пространстве до глубины 10 м следующие: по прошествии более месяца после даты цунами на участке, подвергшемся затоплению, на глубине от 1 м до более 5 м наблюдаются слои флюидонасыщенного грунта с пониженным сопротивлением. Измеренные УЭС ( $<30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) являются нехарактерными для природных вод в окружающей местности. Мы предполагаем, что это линзы морской воды, сформировавшиеся в результате проникновения цунами на незатапливаемый берег и просачивания морской воды до уровня водоупора. За более чем месячный срок от даты цунами произошло значительное разбавление морских вод метеорной водой, что не позволяет четко определить границу заплеска.

Авторы считают, что электротомография может быть перспективным инструментом для оперативного определения заплеска в особых случаях (отсутствие геоморфологических признаков цунами, последующая быстрая маскировка побережья, например, выпадение снега). Время от начала заложения одного профиля длиной 50 м до окончания постобработки данных составило 1-1.5 часа, соответственно, увеличение длины пути будет сопровождаться увеличением затраченного времени.

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИВиС ДВО РАН, тема № FWME-2024-0010, и ИНГГ СО РАН, проект № FWZZ-2026-0049.

### Список литературы

1. Терлецкая А.Т. Растительный покров Дальнего Востока / Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского гос. ун-та, 2013. 116 с.
2. Хмелевской В.К. Электроразведка. М.: Изд-во МГУ, 1984. 422 с.
3. Costall A., Harris B., Pigois J.P. Electrical resistivity imaging and the saline water interface in high-quality coastal aquifers // *Surveys in Geophysics*. 2018. V. 39. P. 753-816. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9468-0>
4. Farreras S.F. Post-tsunami field survey procedures // *Natural Hazards*. 2000. V. 21. P. 207-214. <https://doi.org/10.1023/A:1008049228148>