

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта
Российской академии наук

Волкова Мария Сергеевна

**ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВОЙ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ СМЕЩЕНИЙ НА СКЛОНАХ ВУЛКАНОВ
ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА**

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., профессор, г.н.с.,
Зав. лаб. Комплексной геодинамической интерпретации наземных и спутниковых данных (502)
Михайлов Валентин Олегович

Вулканы Камчатки (красные кружочки на карте)



Изучение и мониторинг вулканических процессов на Камчатке:

Наземные методы

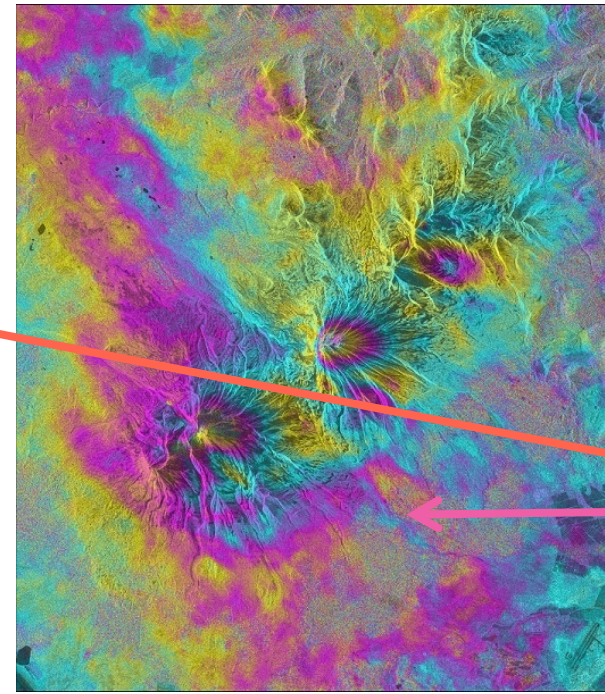
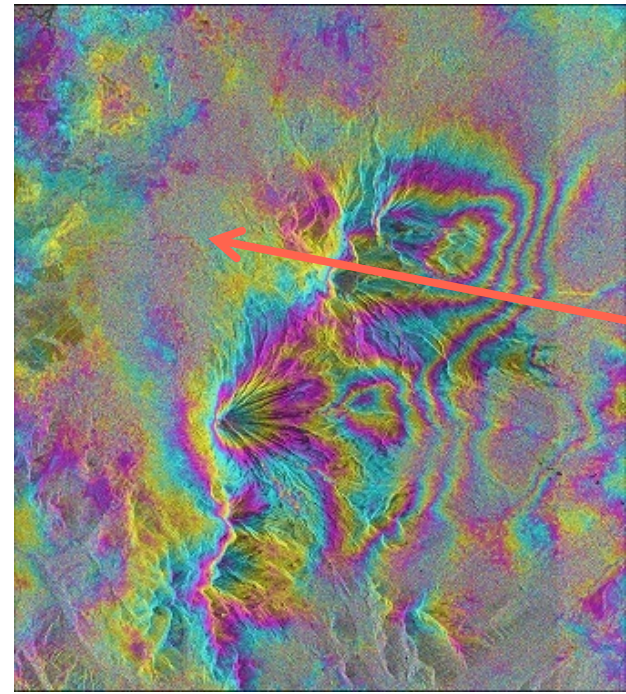
Сети сейсмостанций
Геодезические пункты
Полевые работы

Дистанционные методы

Оптическая спутниковая съёмка
Радиолокационная спутниковая съёмка



1. независимость съёмки от погоды и освещения;
2. доступность и безопасность исследований,
3. возможность получения данных непосредственно в период активности вулканов,
4. возможность использования архивных снимков для изучения исторических извержений



На изображение
интерферограммы сильно
влияет

- состояние атмосферы,

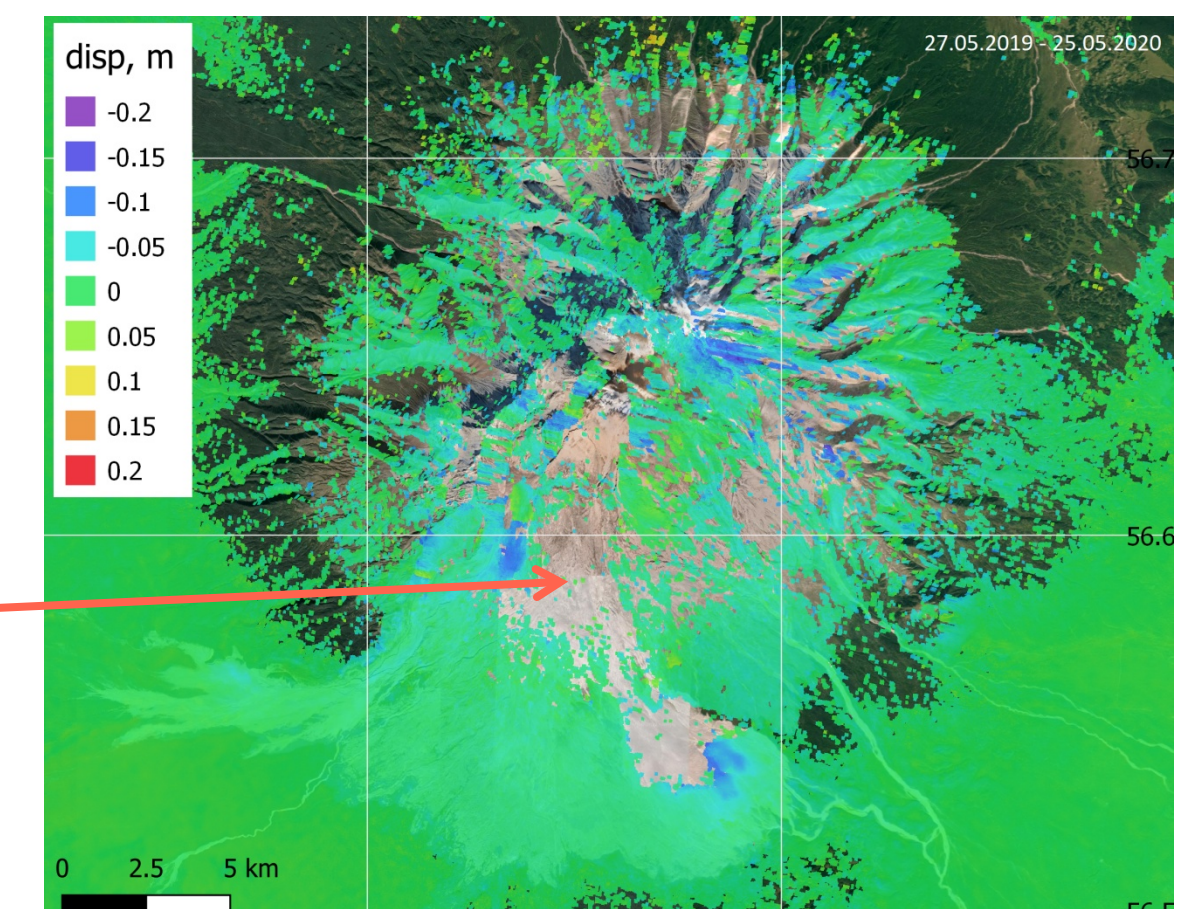
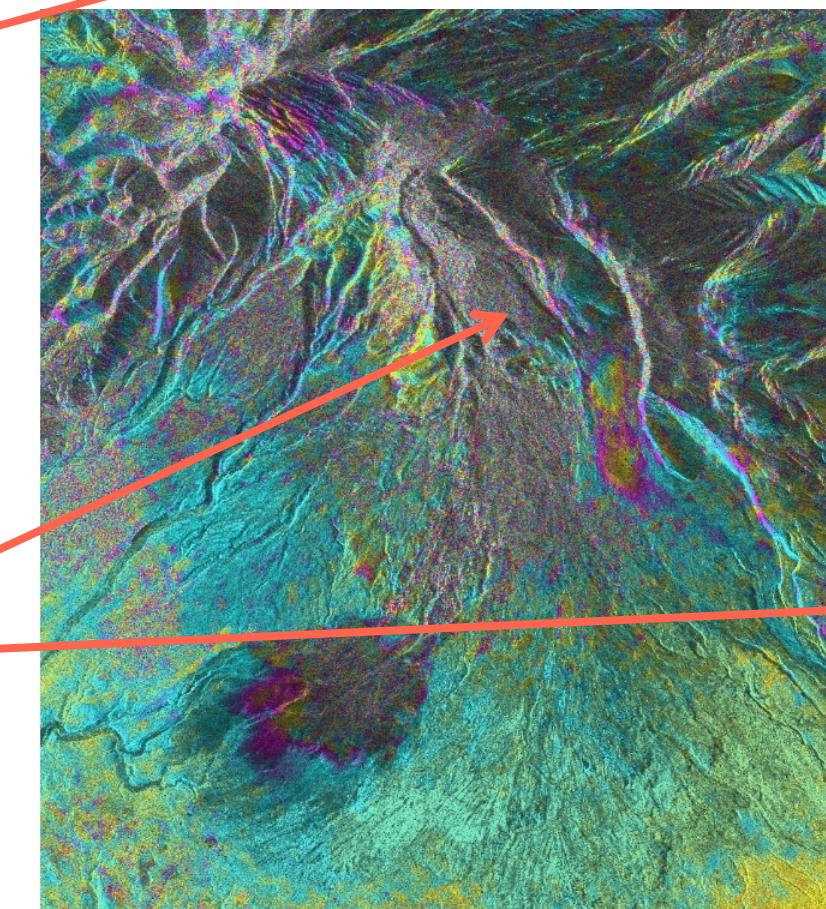
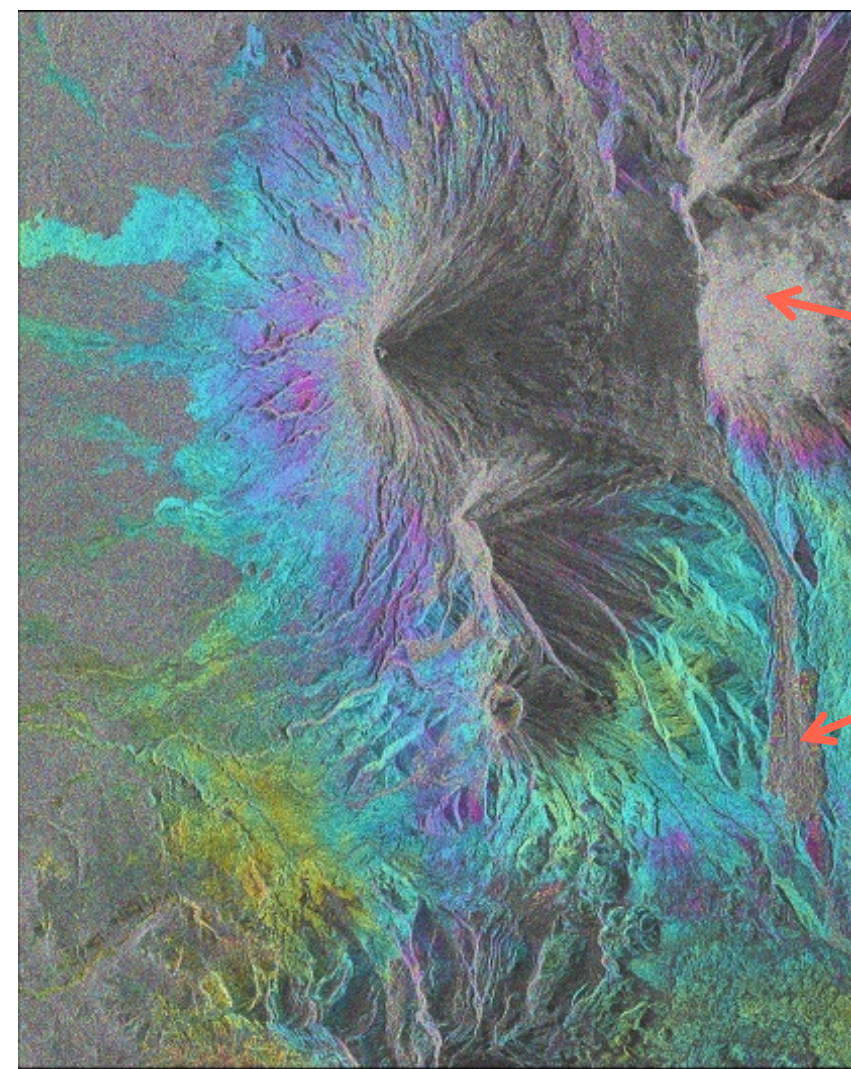
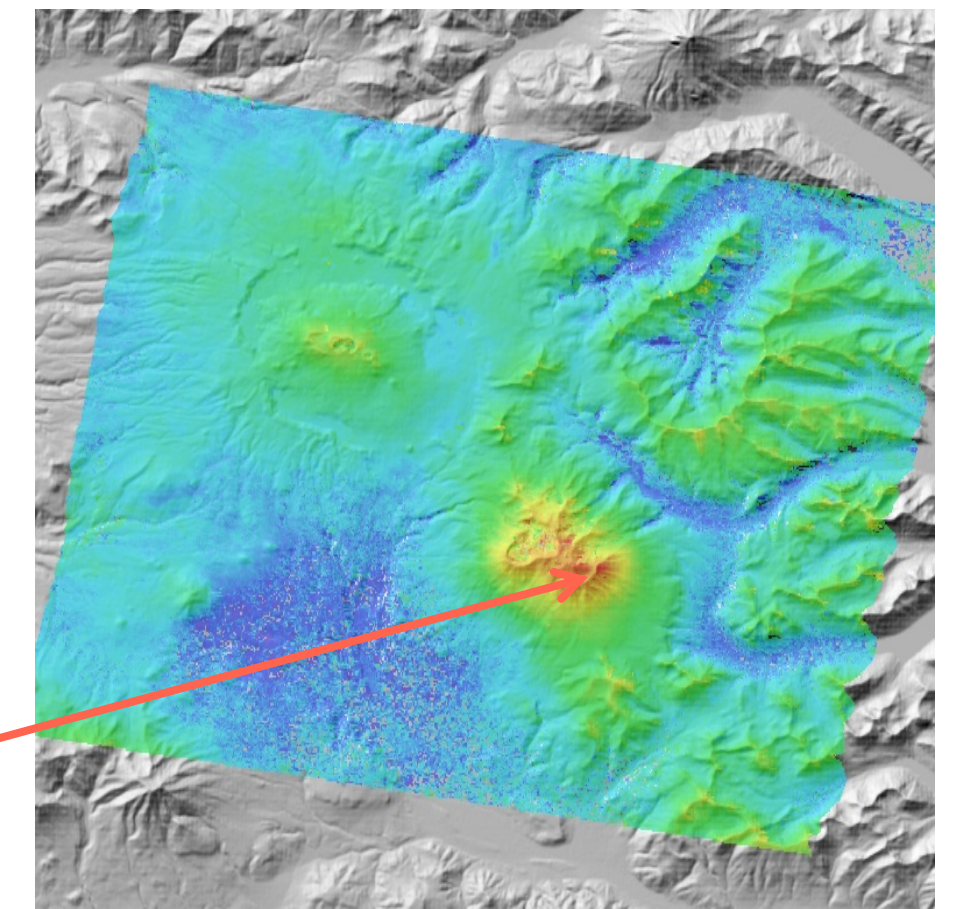
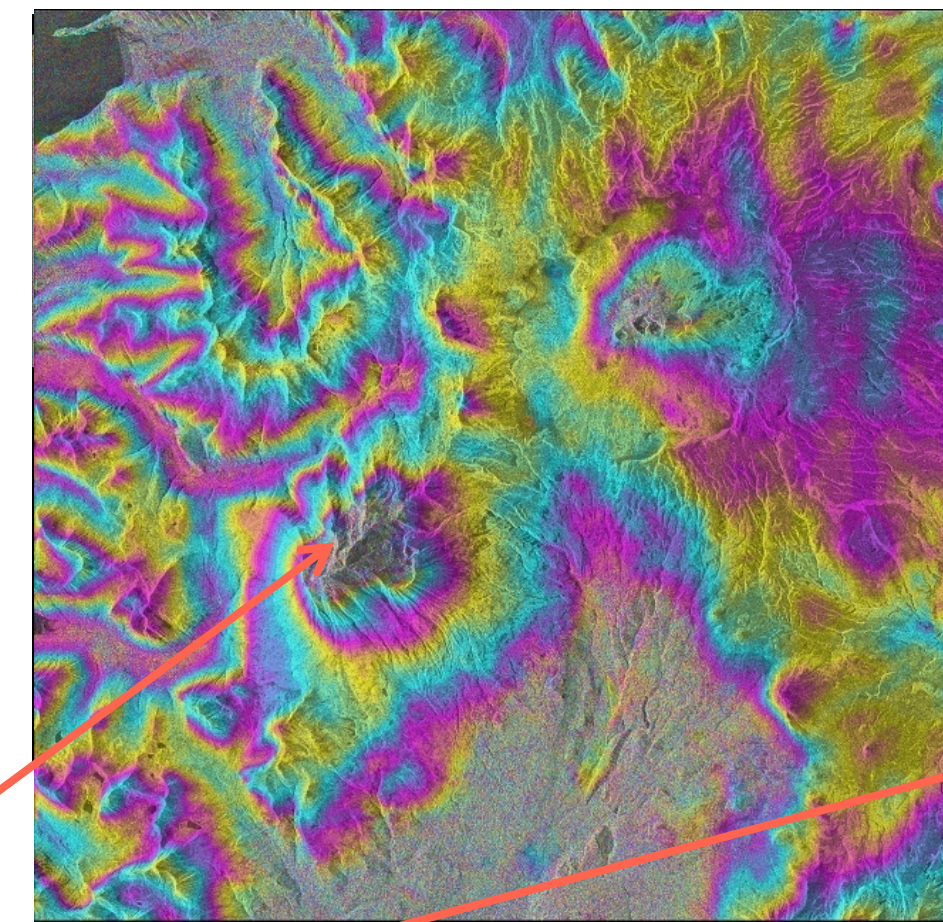
а на качестве сигнала очень
сказывается

- горный рельеф,

- снег, ледники на склонах,

- буйная вегетация,

- поверхностные процессы,
изменения, связанные с
вулканической
деятельностью...



Слева – интерферограмма; Справа – карта смещений по
этой интерферограмме в географических координатах;

Работы по исследованию смещений на вулканах Камчатки:

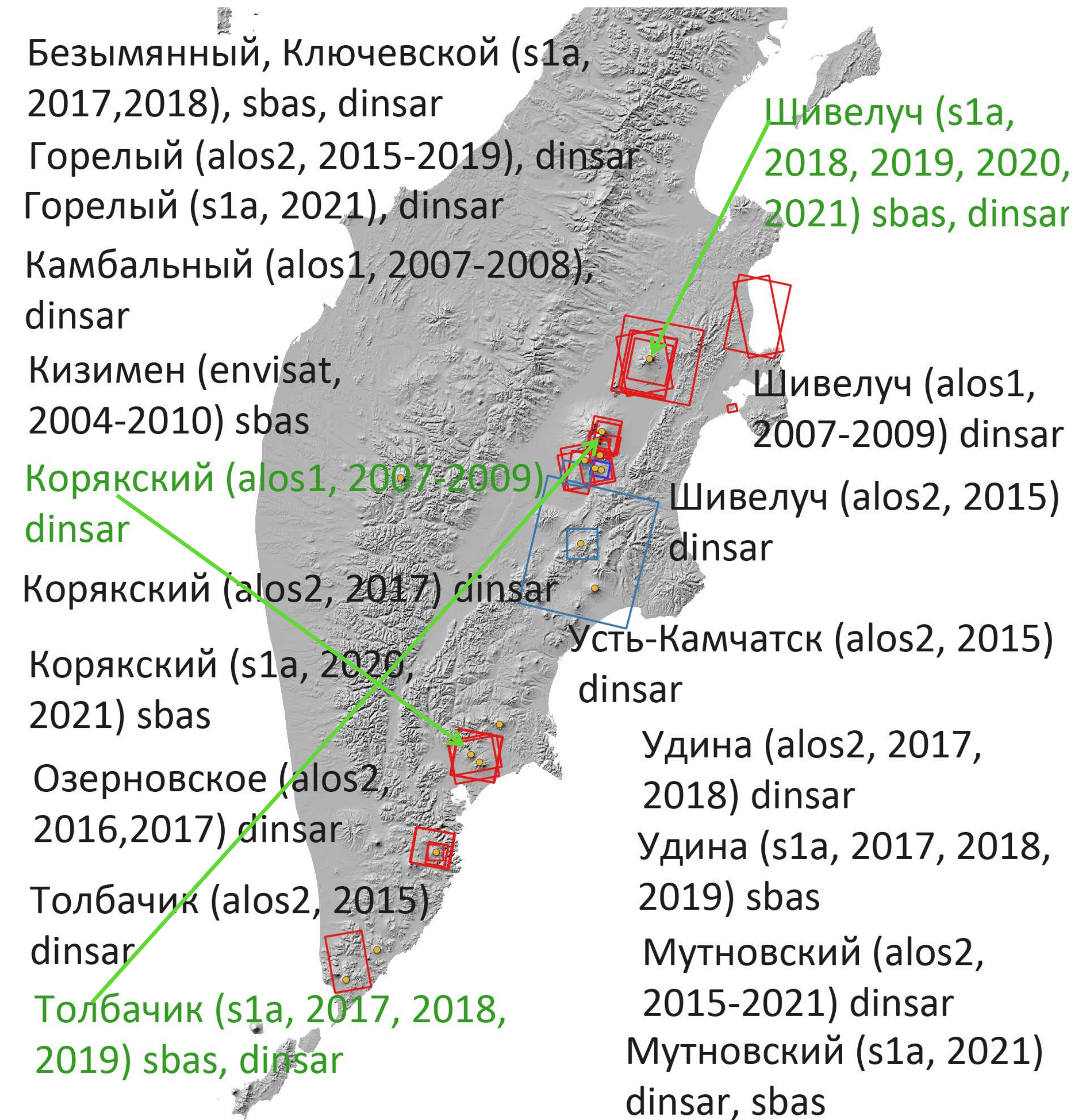
Узон (Lundgren et al., 2006), **Кизимен** (Ji et al., 2013), **Толбачик** (Lundgren et al., 2015; Михайлов и др., 2020), **Карымский** (Ji et al., 2018), **Безымянный** (Mania et al., 2019), **Большая Удина** (Сенюков и др., 2020), **Корякский** (Михайлов и др., 2021).

Решённые задачи

Исследованные вулканические события с 2006 года (год запуска ALOS-1) по настоящее время (2021 г.).

- Формирование и постоянное пополнение базы радарных снимков европейского космического агентства (ESA) Sentinel-1 и японского космического агентства (JAXA) ALOS-1/2.
- Анализ методов и результатов применения PCA интерферометрии на вулканах.
- Разработка технологии обработки PCA снимков C, L диапазонов, адаптированной к специфическим условиям Камчатки.
- Массовая интерферометрическая обработка радарных снимков, поиск и оценка полей смещений в районах активных вулканов.
- Разработка новых и совершенствование имеющихся математических моделей вулканических процессов для интерпретации полученных полей смещений.
- Создание соответствующего программного обеспечения для численного моделирования (C++).

Районы вулканических массивов



Прямоугольные контуры – области исследований

Защищаемые научные положения

- 1. Технология обработки РСА снимков, эффективность которой в условиях полуострова Камчатка (низкая когерентность радарных снимков, горный рельеф, существенное влияние атмосферы) обоснована путем массового тестирования на снимках С и L диапазона (глава 1).**
- 2. Термомеханическая модель процесса оседания поверхности лавового поля, сформированного в результате Трещинного Толбачинского Извержения 2012–2013 гг, которая учитывает скорость формирования потока и определенные по составу лав вулкана Плоский Толбачик скрытую теплоту кристаллизации, зависимости теплоёмкости, теплопроводности и плотности от температуры, температурную зависимость концентрации кристаллов в объёме расплава и процент незакристаллизованного материала (стекло или расплав), а также пористость (глава 2).**
- 3. Математическая модель формирования дайки в процессе извержения вулкана Корякский в 2008–2009 гг., основанная на решении Окада (1985, 1992), модифицированном для компенсации влияния горного рельефа (глава 3).**
- 4. Термомеханическая модель остывания пирокластического потока, сформированного в результате извержения 29.08.2019 г. вулкана Шивелуч, учитывающая компакцию отложений за счёт изменения во времени их пористости и плотности (глава 4).**

I. Технология обработки РСА снимков, адаптированная к условиям Камчатки

Основные технологии: **DInSAR** – дифференциальная интерферометрия (обработка пары снимков); **SBAS** (Small Baseline Subset) – обработка серии снимков;

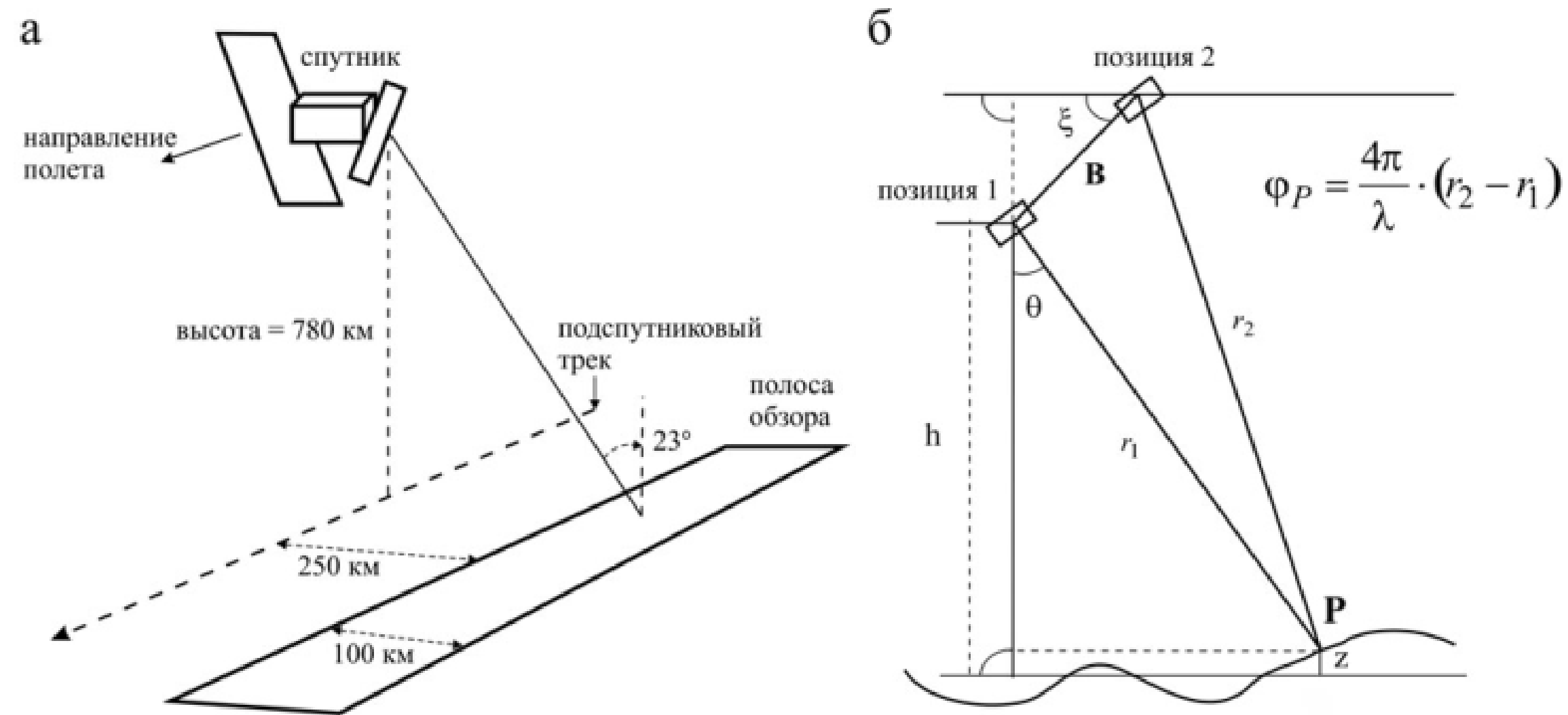


Рис. Геометрическая схема интерферометрической съёмки на примере данных спутника ERS. r_1 и r_2 - расстояние до отражающей площадки P при первой и второй съемке, B – базовая линия, h – высота над эллипсоидом, z – высота отражающей площадки над эллипсоидом (задается по цифровой модели рельефа – ЦМР), θ – угол наклона зондирующего луча.

$$\varphi = W\{\varphi_{def} + \varphi_{atm} + \Delta\varphi_{orb} + \Delta\varphi_{\theta} + \varphi_N\}$$

φ_{def} – деформационная составляющая,

φ_{atm} – набег фазы из-за изменения атмосферных условий между двумя моментами съёмки;

$\Delta\varphi_{orb}$ – составляющая, обусловленная неточностями знания орбит из-за ошибок измерения параметров относительного движения и ошибок ориентации спутника;

$\Delta\varphi_{\theta}$ – составляющая из-за ошибок угла обзора, (ошибка ЦМР, неточность определения положения фазового центра);

φ_N – фазовый шум, помехи, (изменение характеристик отражателей, тепловой шум, ошибки корегистрации, аппаратурные искажения...);

$W\{\dots\}$ – оператор свертки по модулю 2π .

I. Технология обработки РСА снимков, адаптированная к условиям Камчатки

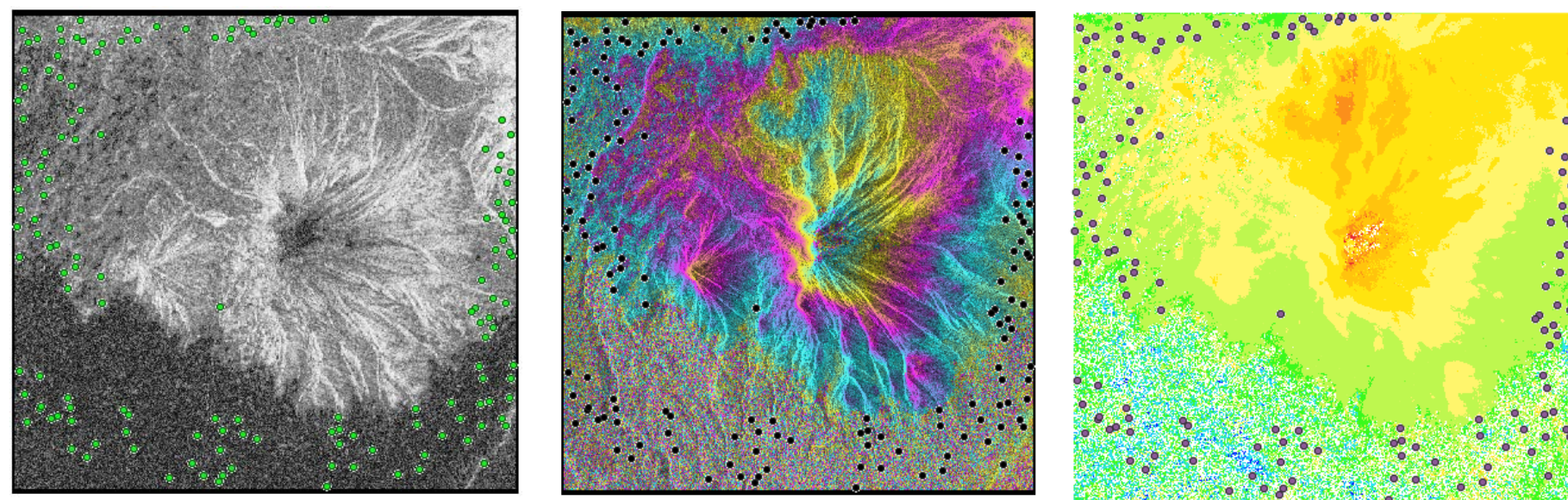
Основные этапы:

1. Выбор снимков, (Sentinel-1 / ALOS-1/2),
2. Выбор метода обработки (DInSAR / SBAS),
3. Выбор области исследования,
4. Выбор цифровой модели рельефа – ЦМР, (SRTM3, SRTM1, AW3D30),
5. Формирование стека интерферограмм,
6. Построение интерферограмм,
7. Фильтрация интерферограмм,
8. Фазовая развёртка интерферограмм,
9. Выравнивание фазового поля,
10. Фильтрация атмосферной компоненты,
11. Оценка смещений, геокодирование.

Выравнивание фазового поля с помощью контрольных точек (GCPs)

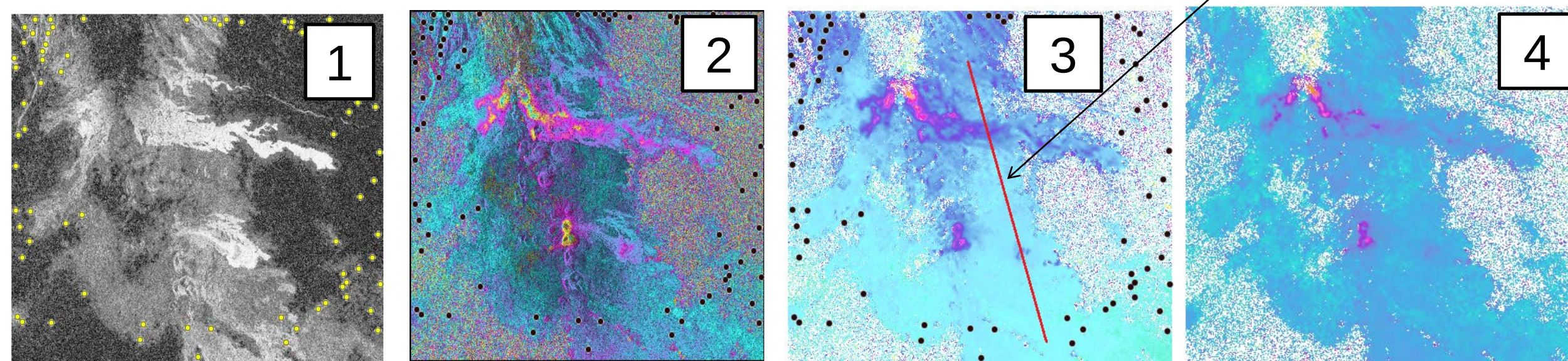
В реальной ситуации на Камчатке зачастую наилучшую когерентность имеют скальные выступы, горные хребты, лавовые поля, т.е. как раз те области, которых надо избегать при выборе местоположения контрольных точек.

Б.Удина, GCPs=149

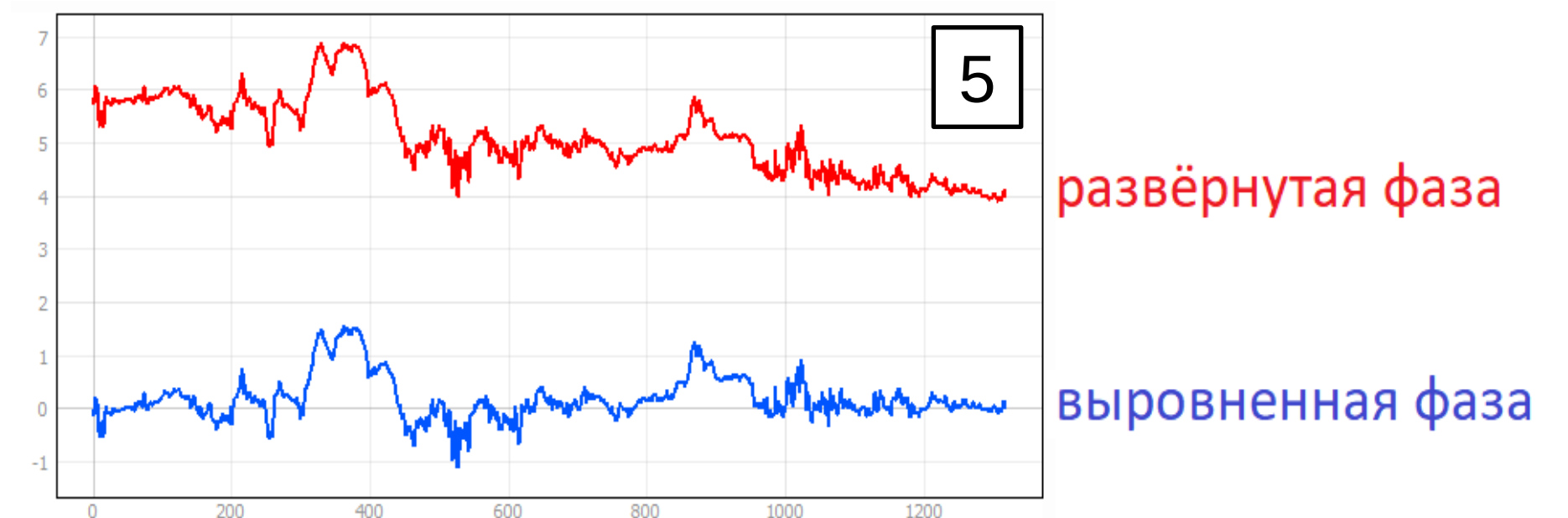


Пример расстановки контрольных точек.
Карты (слева направо): когерентность, свёрнутая интерферограмма, развёрнутая интерферограмма.

Толбачик, GCPs=75



Профиль

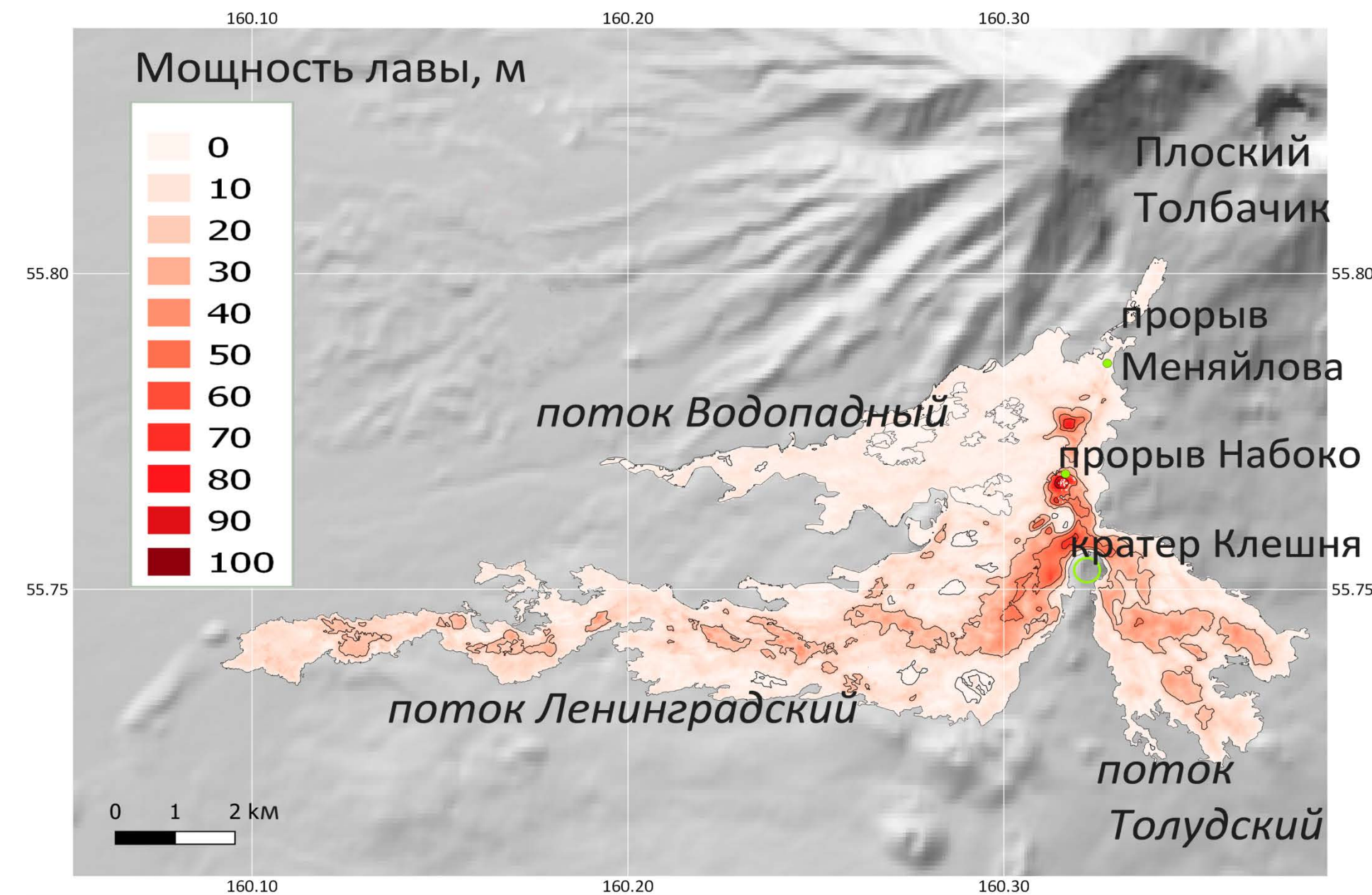
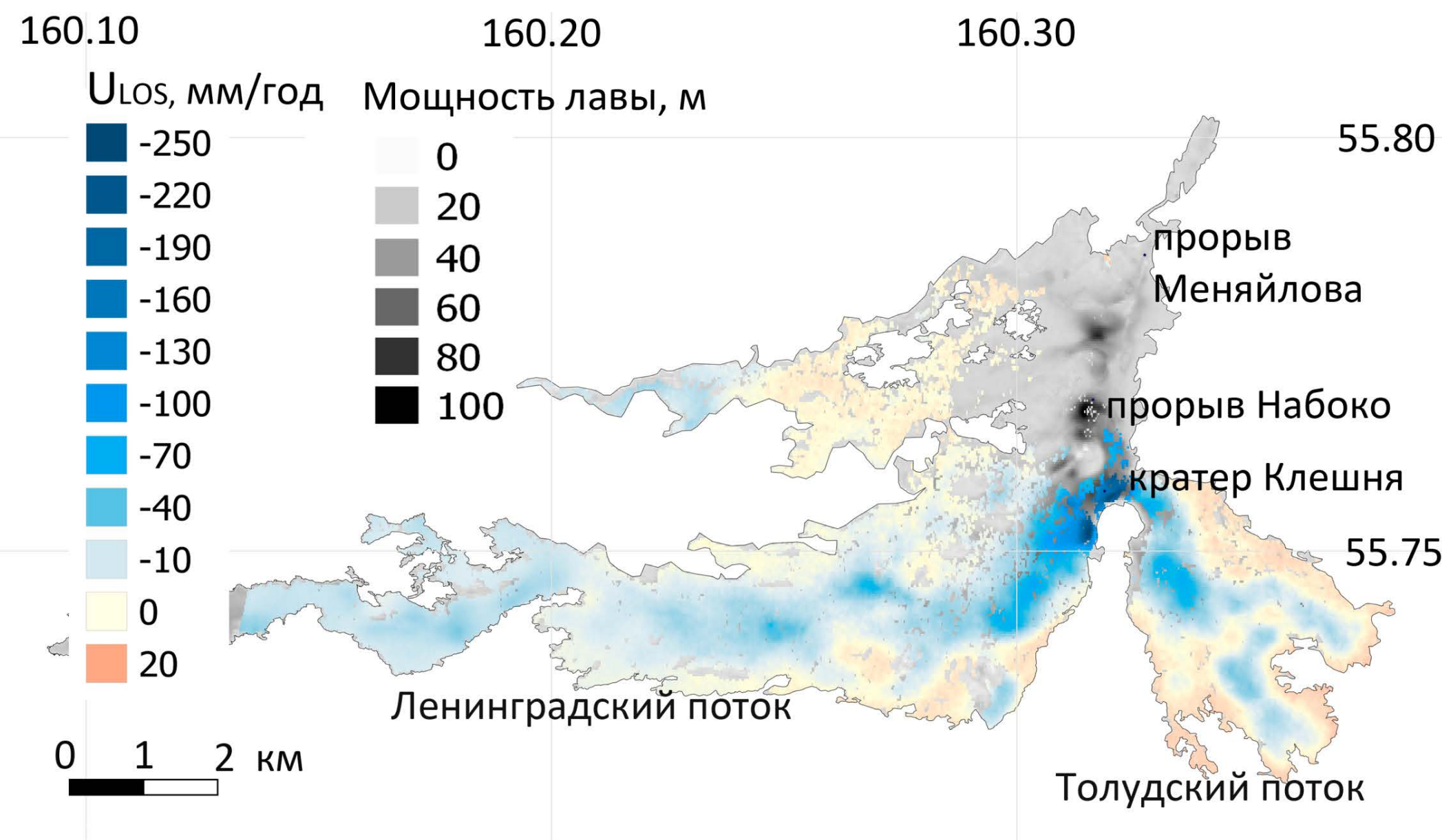


Карты: 1) когерентность, 2) свёрнутая фаза, 3) развёрнутая фаза, 4) выровненная фаза, 5) профиль (красная линия на карте 3. Синий график показывает устранение градиента фазы)

Выводы

- Для обработки спутниковых радарных снимков хорошо зарекомендовал себя L-диапазон (спутник ALOS-1/2).
- Ограничения к применению снимков ALOS: у длинноволнового диапазона хуже радиометрическое разрешение, и большой интервал съёмки территории Камчатки (1-2 раза в год).
- Снимки L-диапазона спутника ALOS-1/2 подходят для применения метода парных интерферограмм (DInSAR).
- Для исследования динамики смещений во времени (применение метода SBAS) преимущественно используются снимки спутника Sentinel-1, С-диапазона.
- Отработанная технология применения РСА-интерферометрии позволила определить сценарий обработки снимков: диапазон параметров и методов для применения на территории полуострова Камчатка.

II. Термомеханическая модель процесса оседания поверхности лавового поля Трещинного Толбачинского Извержения 2012 – 2013 гг.

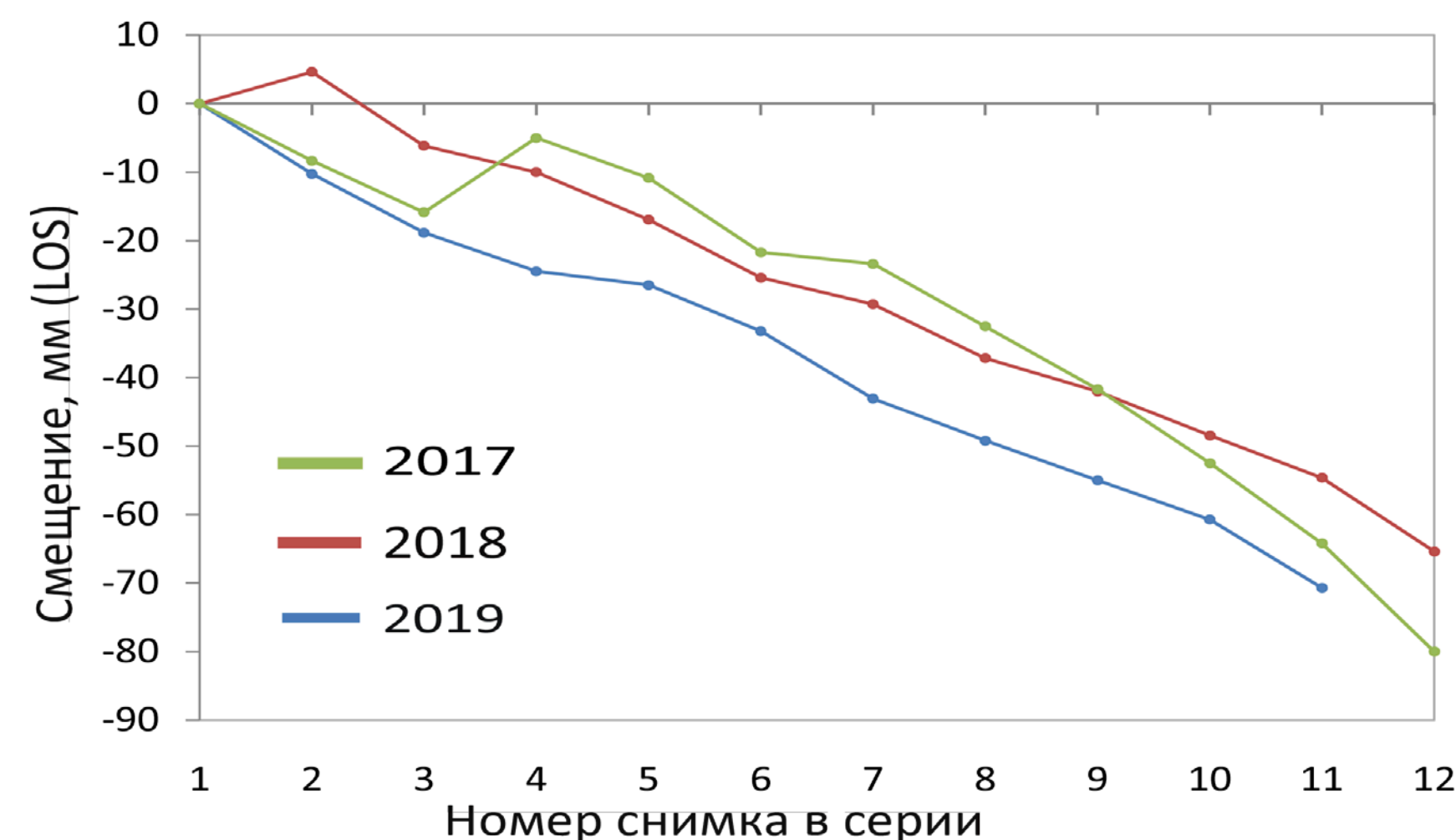


Карта мощности лавовых потоков (метры), сформированных в результате ТТИ-50 по данным (Dai, Nowat, 2017).

Карта средних скоростей смещений поверхности лавы по снимкам Sentinel-1A 2019 г. (цветная шкала, мм/год).

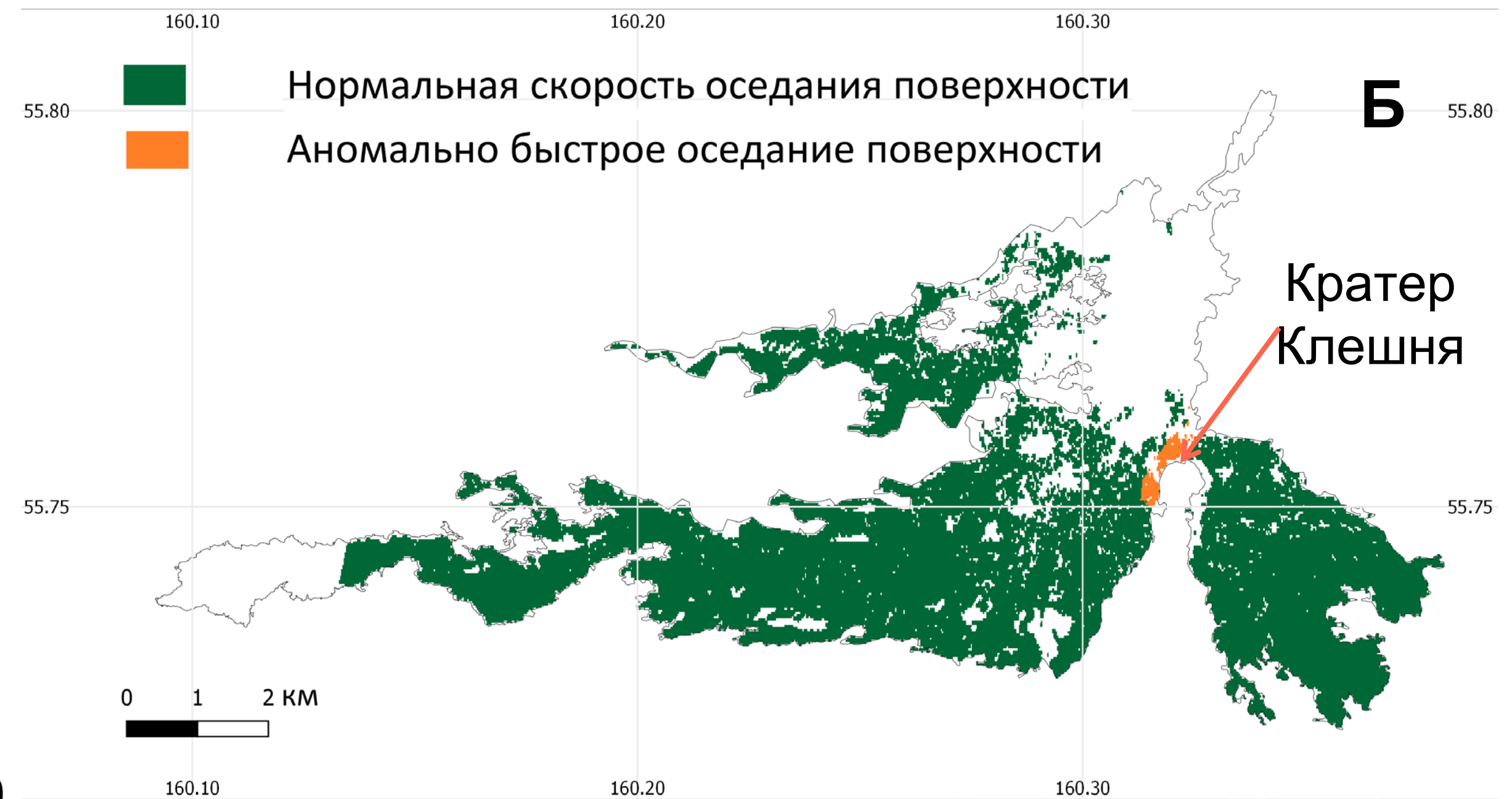
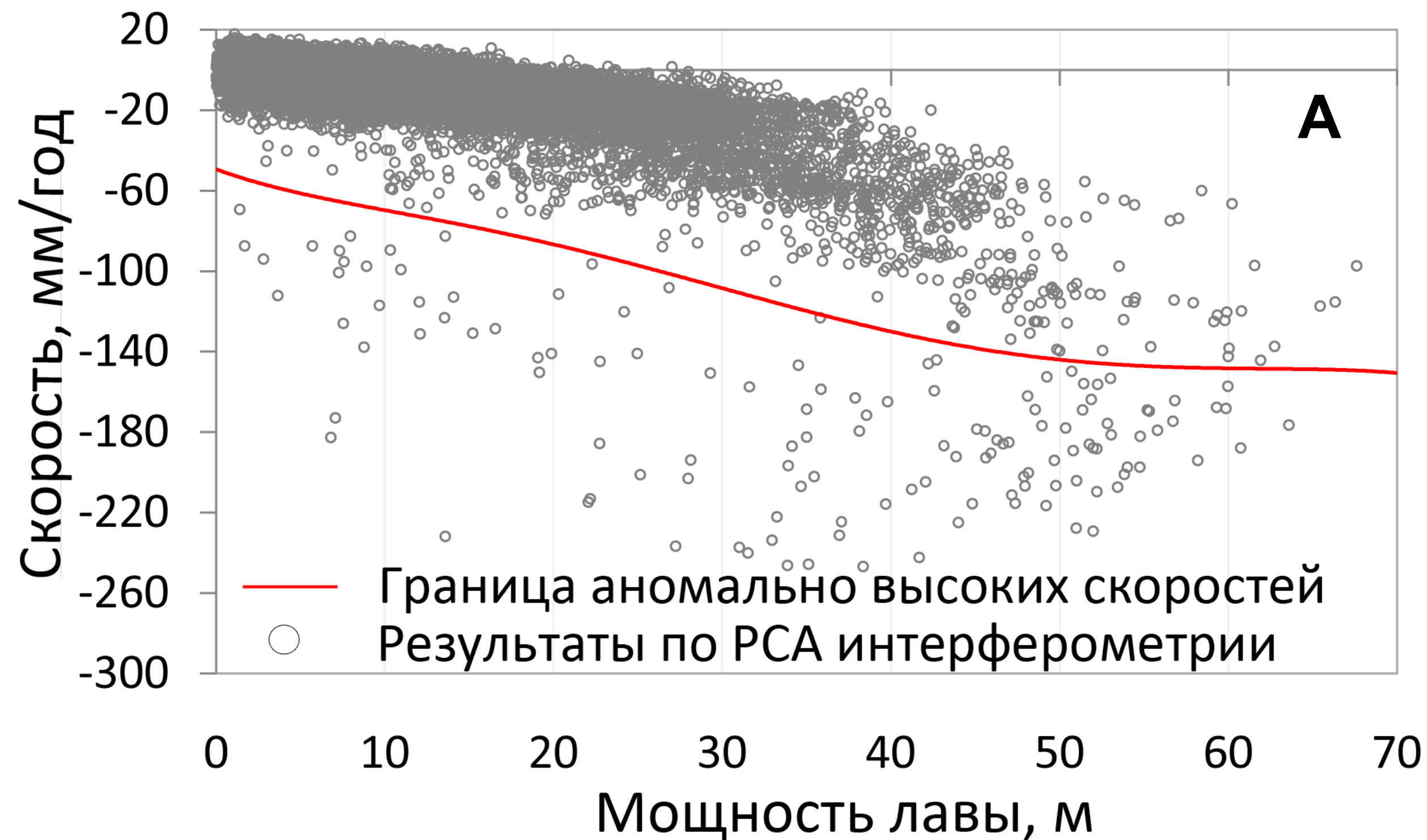
Карта мощности лавы по данным Dai и Nowat (2017) (чёрно-белая шкала, м)

2017	2018	2019
285 мм/год	249 мм/год	261 мм/год



Динамика смещений во времени в районе кратера Клешня.

II. Термомеханическая модель процесса оседания поверхности лавового поля Толбачика



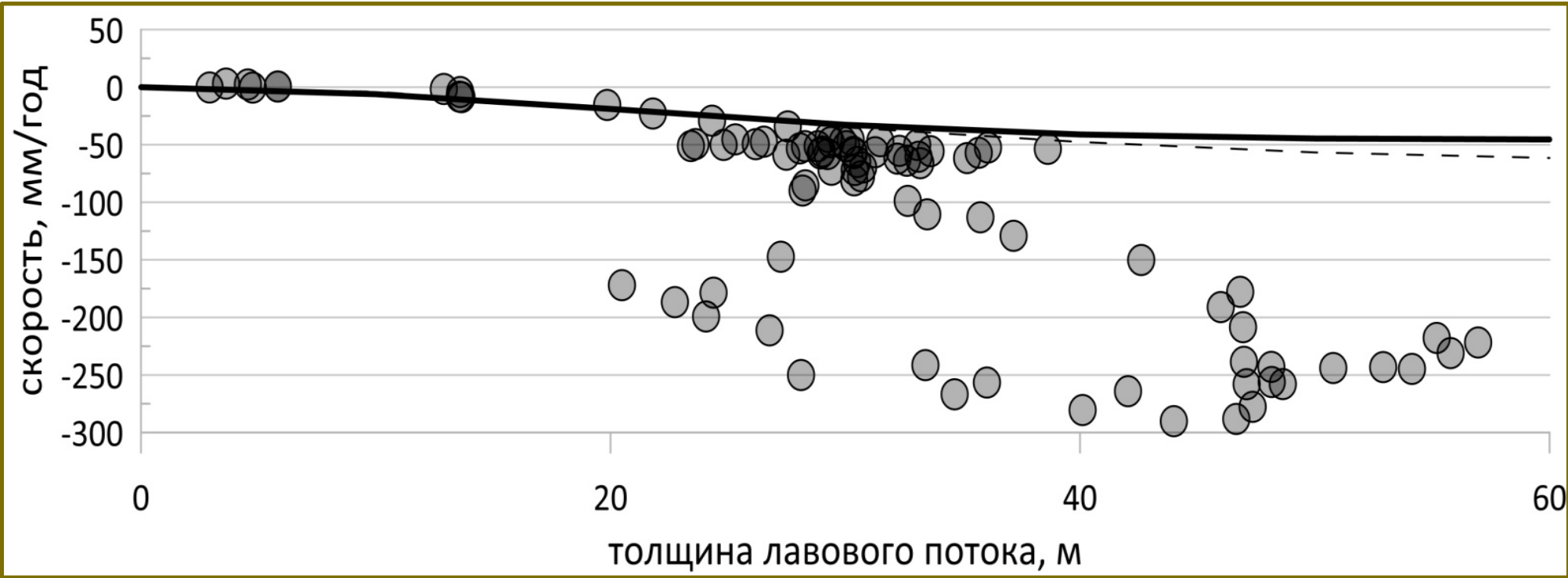
А – Сравнение скорости оседания лавы, полученной по данным радарной интерферометрии с мощностью лавового слоя. Красная линия обозначает границу между "нормальным" и "аномальным" поведением скорости.

Б – Географическое положение точек с "нормальными" (зелёный цвет) и "аномальными" (жёлтый цвет) скоростями усадки.

II. Термомеханическая модель процесса оседания поверхности лавового поля Толбачика

Модель I (коэффициенты-константы)

Сравнение расчетных данных по **Модели I** для максимальной мощности слоя лавы 100 м с интерферометрическими оценками.



Год	Погружение поверхности (ΔS , м)	Уменьшение мощности лавы (ΔH , м)	Вертикальное оседание по данным РСА, м
2017	0.057	0.083	0.285
2018	0.051	0.074	0.249
2019	0.046	0.067	0.261

Модель II (параметры, определенные по составу лав вулкана Плоский Толбачик)

- скрытая теплота кристаллизации,
- зависимости теплоёмкости, теплопроводности и плотности от температуры,
- концентрацию кристаллов в объёме расплава также в зависимости от температуры,
- процент незакристаллизованного материала (стекло или расплав),
- пористость,
- скорость формирования толщины лавового слоя.

Работы по **термическому остыванию** лавы, например, Shaw et al. (1977); Keszthelyi u Denlinger (1996); Neri (1998); Patrick et al. (2004); Chaussard (2016); Wittmann et al. (2017); Carrara et al. (2019)

II. Термомеханическая модель процесса оседания поверхности лавового поля Толбачика

Постановка задачи

Уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + W(z, t) \frac{\partial T}{\partial z} + Q(z, t, T)$$

с начальными и граничными условиями:

$$T(z, t = 0) = \begin{cases} T_{mel}; & \text{при } z = [-H_{ini}; 0]; \\ dT_0 * z; & \text{при } z = (0; H_{max}]; \end{cases}$$

$$T(z, t > 0) = \begin{cases} 0; & \text{при } z = -H_{ini}; \\ dT_0 * z; & \text{при } z = H_{max}; \end{cases}$$

где

$T(z, t)$ и $W(z, t)$ – температура и скорость оседания лавы;

$\Delta z(t, T) = \Delta z(T_{mel}) * \rho(T_{mel}) / \rho(t, T)$ – элементы сетки

$Q(z, t, T) = L / C_p * X_{cr} * \partial X(z, T) / \partial t$ – количество теплоты,

$X(z, T)$ – доля затвердевшей части лавы на глубине z .

$L = 3.5 * 10^5$ Дж/кг – удельная теплота кристаллизации;

C_p – удельная теплоёмкость, согласно (Patrick et al., 2004):

$$C_p(T) = 1100; \text{ при } T > 1010 \text{ K};$$

$$C_p(T) = 1211 - (1.12 * 10^5) / T; \text{ при } T < 1010 \text{ K};$$

λ – теплопроводность, согласно (Hidaka et al., 2005):

$$\lambda(T) = 1.15 + 5.9 * 10^{-7} * (T - 1200 \text{ C})^2, \text{ при } T < 1200^\circ \text{C}$$

$$\lambda(T) = 1.15 + 9.7 * 10^{-6} * (T - 1200 \text{ C})^2, \text{ при } T > 1200^\circ \text{C}$$

k – температуропроводность, равная $k = \lambda / (\rho * C_p)$;

H_{ini} – начальная мощность лавового слоя;

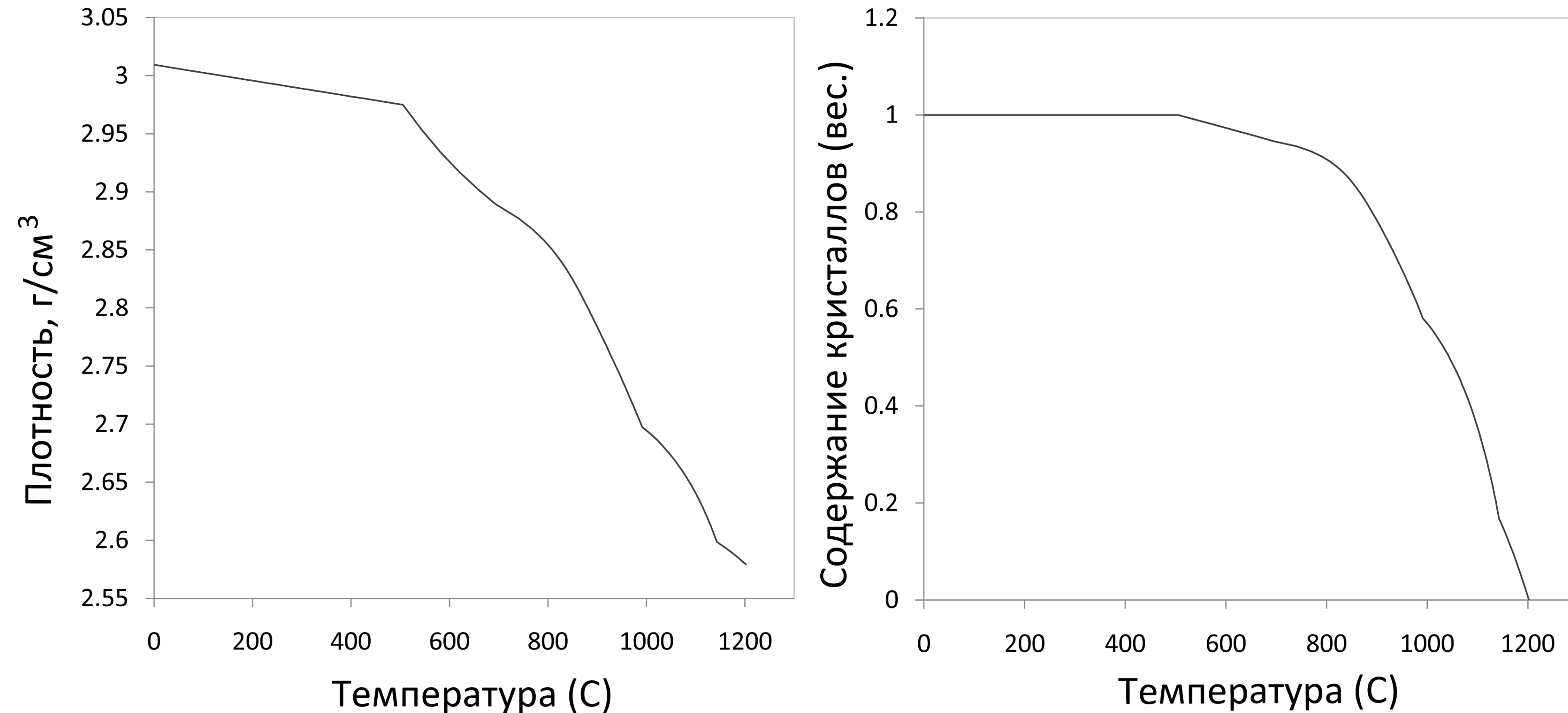
H_{max} – глубина нижней границы модели;

$T_{mel} = 1100^\circ \text{C}$ – начальная температура расплава,

$dT_0 = 50^\circ \text{C/km}$ – градиент температуры в грунте.

II. Термомеханическая модель процесса оседания поверхности лавового поля Толбачика

Модель плотности



Зависимости плотности (г/см³) кристаллов (слева) и содержания кристаллов $X(T)$ (доли единицы) в расплаве (справа) от температуры, определенные по лабораторным данным с помощью программы Petrolog 3 (*Danyushevsky, Plechov, 2011*) конкретно для лав Толбачика.

II. Термомеханическая модель процесса оседания поверхности лавового поля Толбачика

Модель плотности

Пусть X_{cr} , X_{gl} и X_{por} – объемные доли кристаллов, стекла и пор (газа) в затвердевшей части лавы

$$X_{cr} + X_{gl} + X_{por} = 1.$$

Начальные значения:

$$X_{gl} = 0.2, X_{por} = 0.1, \text{ тогда } X_{cr} = 1 - (X_{gl} + X_{por}) = 0.7.$$

Плотность:

1) Расплавленная часть лавы:

$$\rho_{lava}(t, T_{melt}) = \rho_{melt} * (1 - X_{por}) + \rho_{por}(t, T) * X_{por}$$

2) Затвердевшая часть лавы:

$$\rho_{solid}(t, T) = \rho_{cr}(t, T) * X_{cr} + \rho_{gl}(t, T) * X_{gl} + \rho_{por}(t, T) * X_{por}$$

3) Общая плотность:

$$\rho_{total}(t, T) = \rho_{solid}(t, T) * X(t, T) + \rho_{lava}(t, T) * (1 - X(t, T))$$

или (подставив (1) и (2) в (3))

$$\rho_{total}(t, T) = (\rho_{cr}(t, T) * X_{cr} + \rho_{gl}(t, T) * X_{gl}) * X(t, T) + \rho_{melt} * (1 - X_{por}) * (1 - X(t, T)) + \rho_{por}(t, T) * X_{por},$$

$\rho_{cr}(t, T)$ и $X(t, T)$ плотность кристаллов и их концентрация – определены зависимостями.

Плотность стекла меняется только за счет охлаждения:

$$\rho_{gl}(t, T) = \rho_{melt} \cdot (1 - \alpha_{v_glass} \cdot (T - T_{mel}^{(0)})),$$

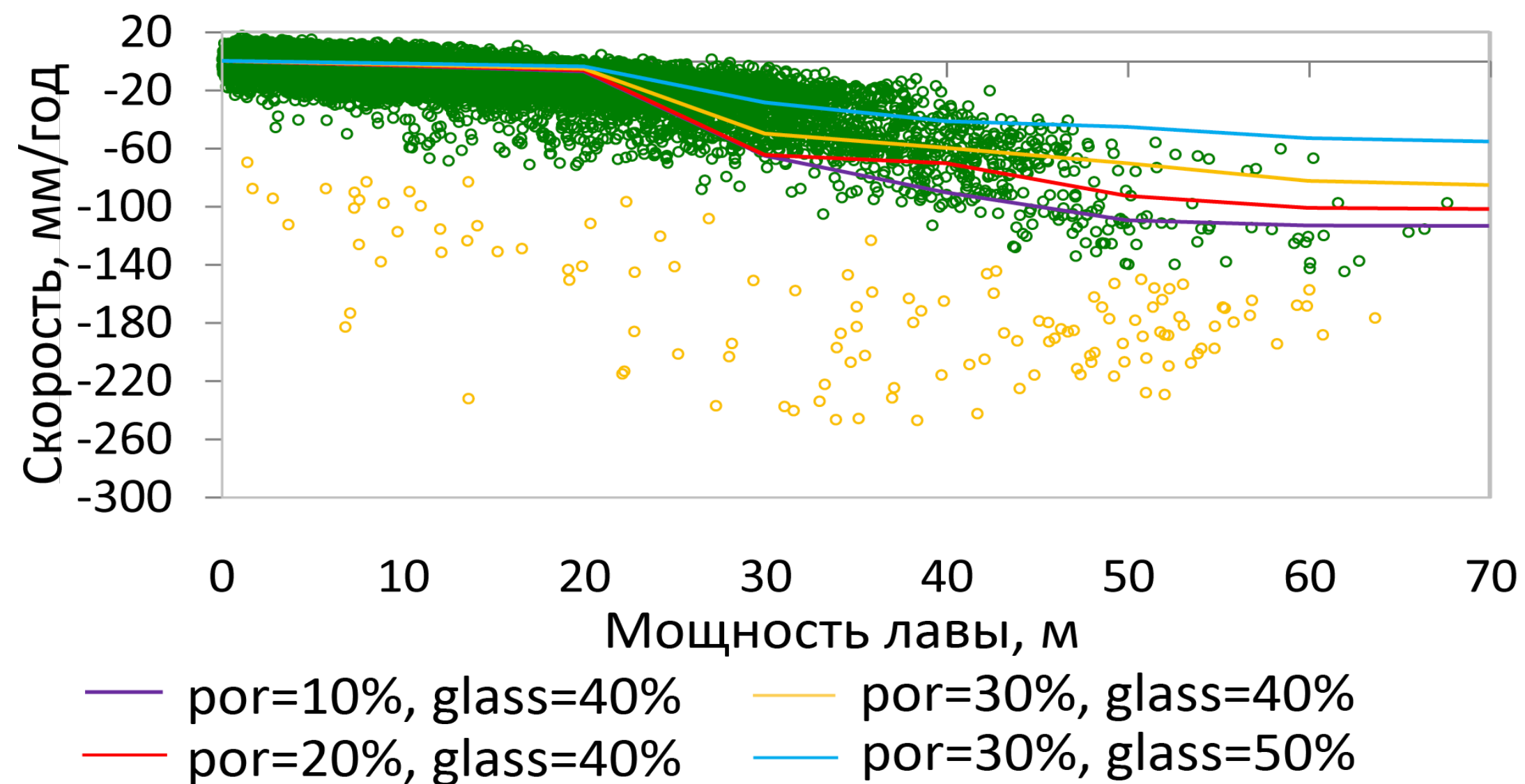
$$\alpha_{v_glass} = 5.8 \cdot 10^{-7} \text{ 1/град}$$

$$\rho_{melt} = 2.6428 \text{ г/см}^3, \text{ (см. зависимость при нач. } T = 1100 \text{ °C)}$$

$$\rho_{por}(t, T) = 0.001 \text{ г/см}^3,$$

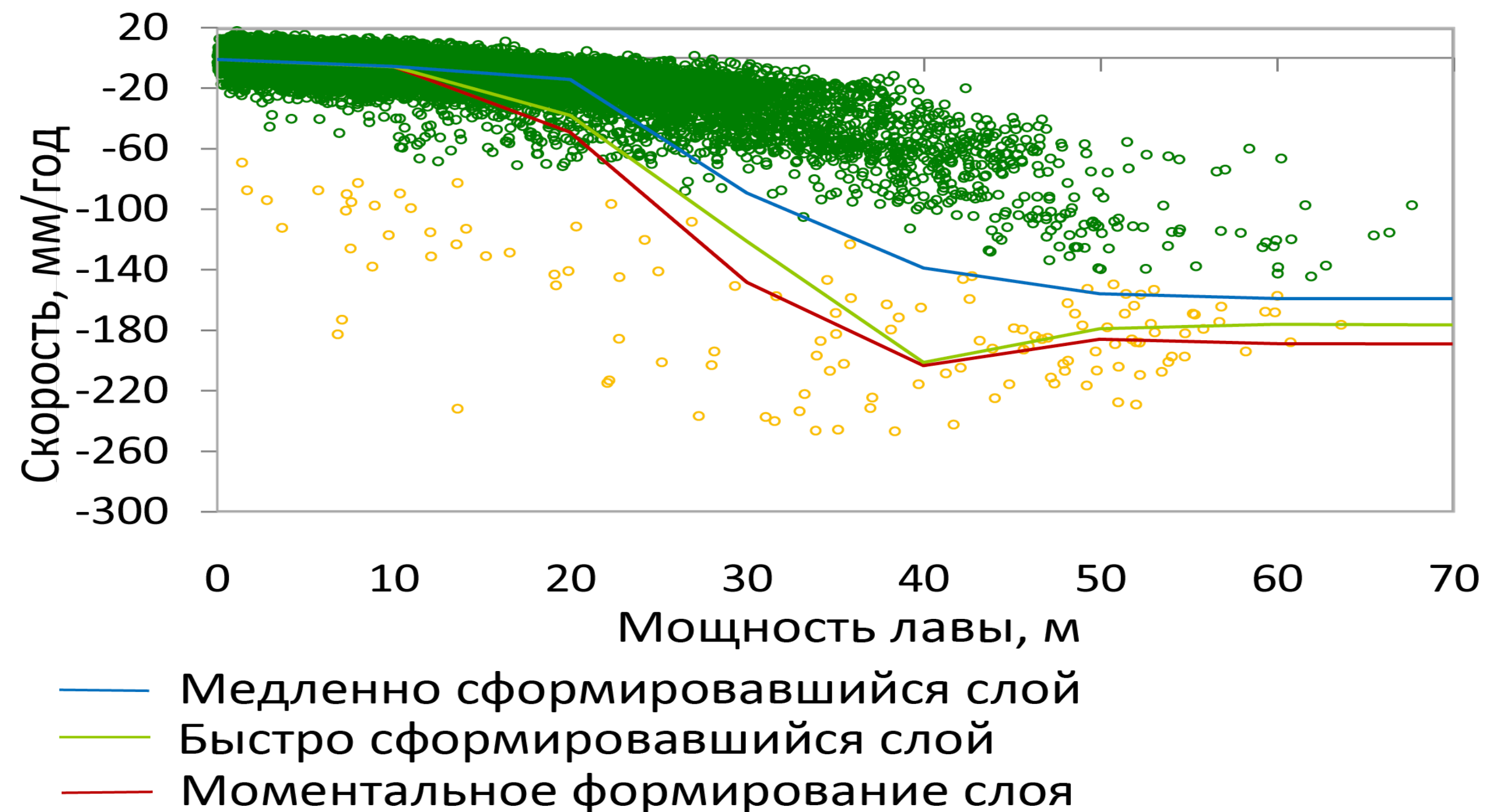
II. Термомеханическая модель процесса оседания поверхности лавового поля Толбачика

1) Сценарий "**медленного**" формирования слоя ($dh/dt = 6\text{м}/20\text{дн}$) показывает наилучшее соответствие "**нормальным**" скоростям оседания лавы (зелёные круги).

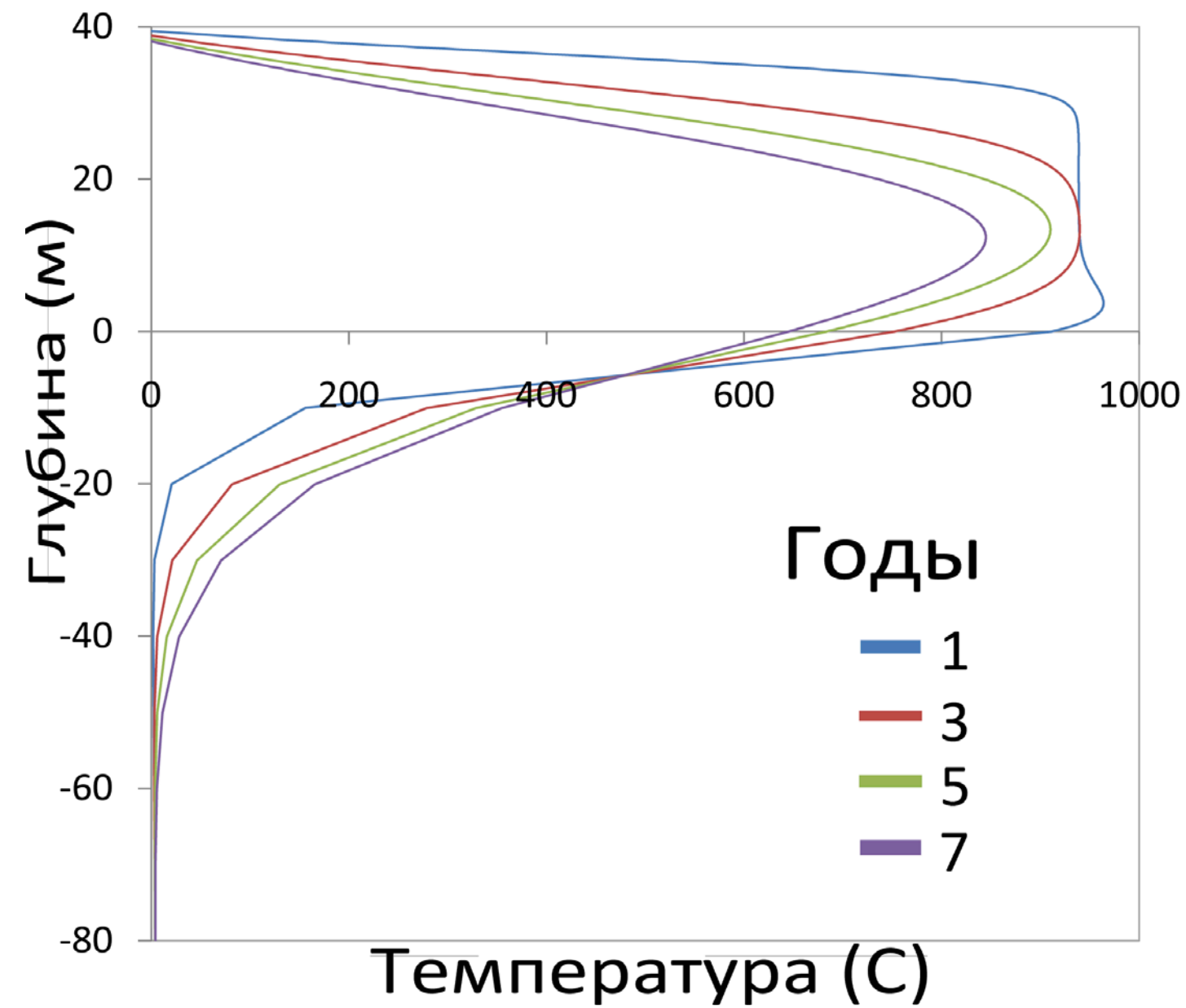


3) Увеличение количества стекла в конечном составе лавы, так же как и увеличение пористости, приводит к снижению скорости оседания поверхности лавы.

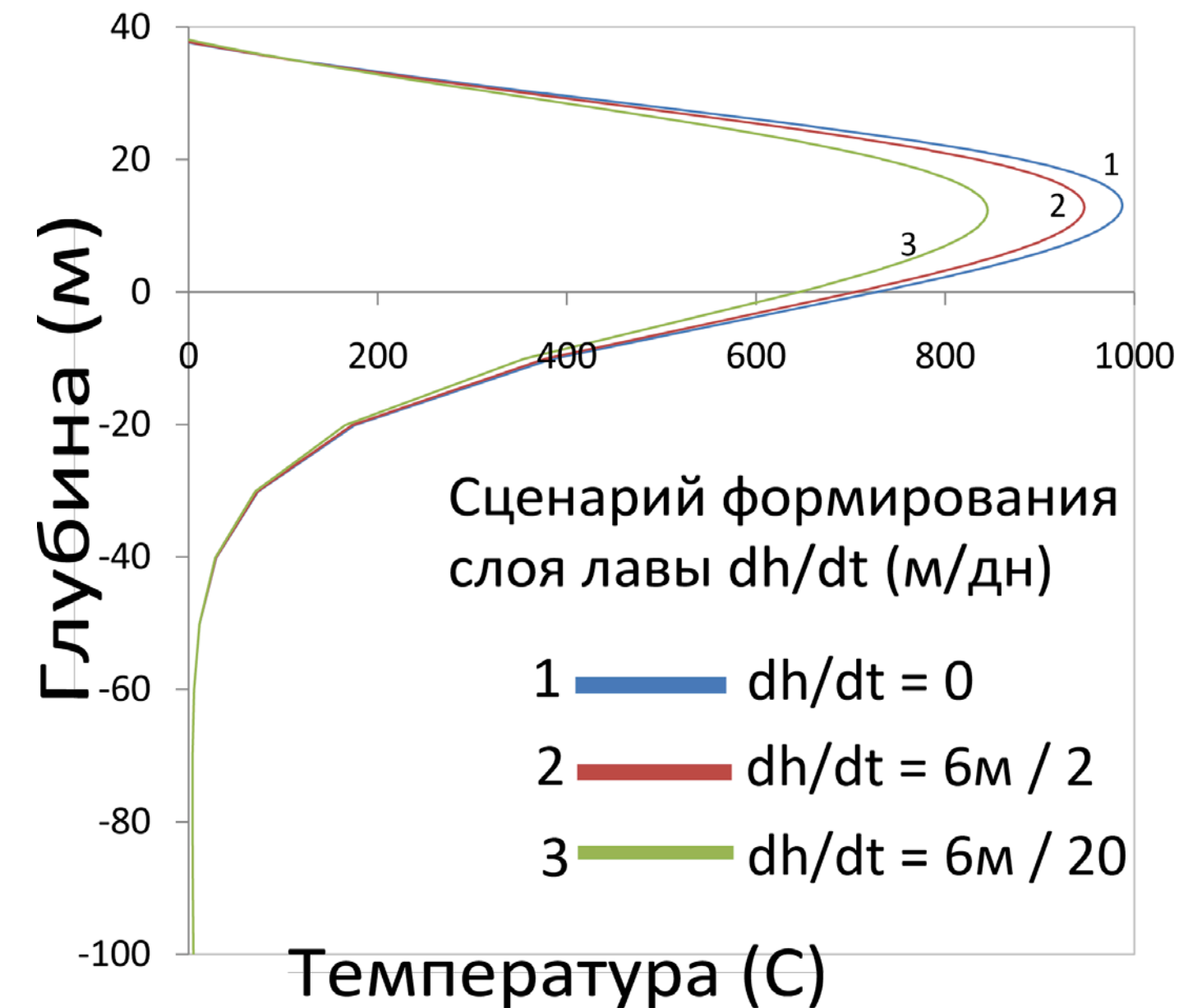
2) Сценарии "**быстрого**" ($dh/dt = 6\text{м}/2\text{дн}$) и "**мгновенно** образовавшегося" слоя лавы лучше соответствуют **аномально-высоким** скоростям оседания лавы (желтые круги). Пористость 10%, содержание стекла 20%.



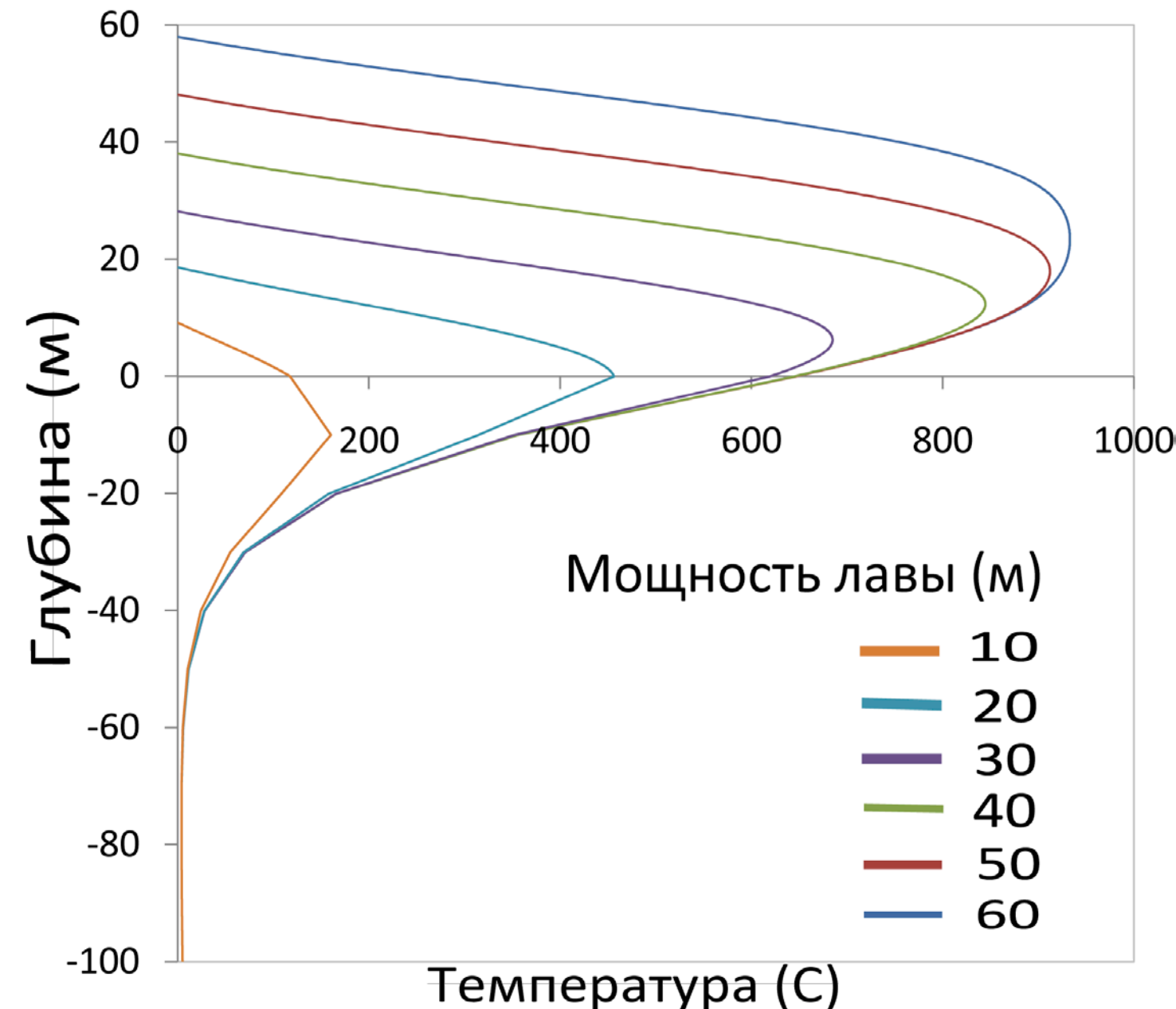
II. Термомеханическая модель процесса оседания поверхности лавового поля Толбачика



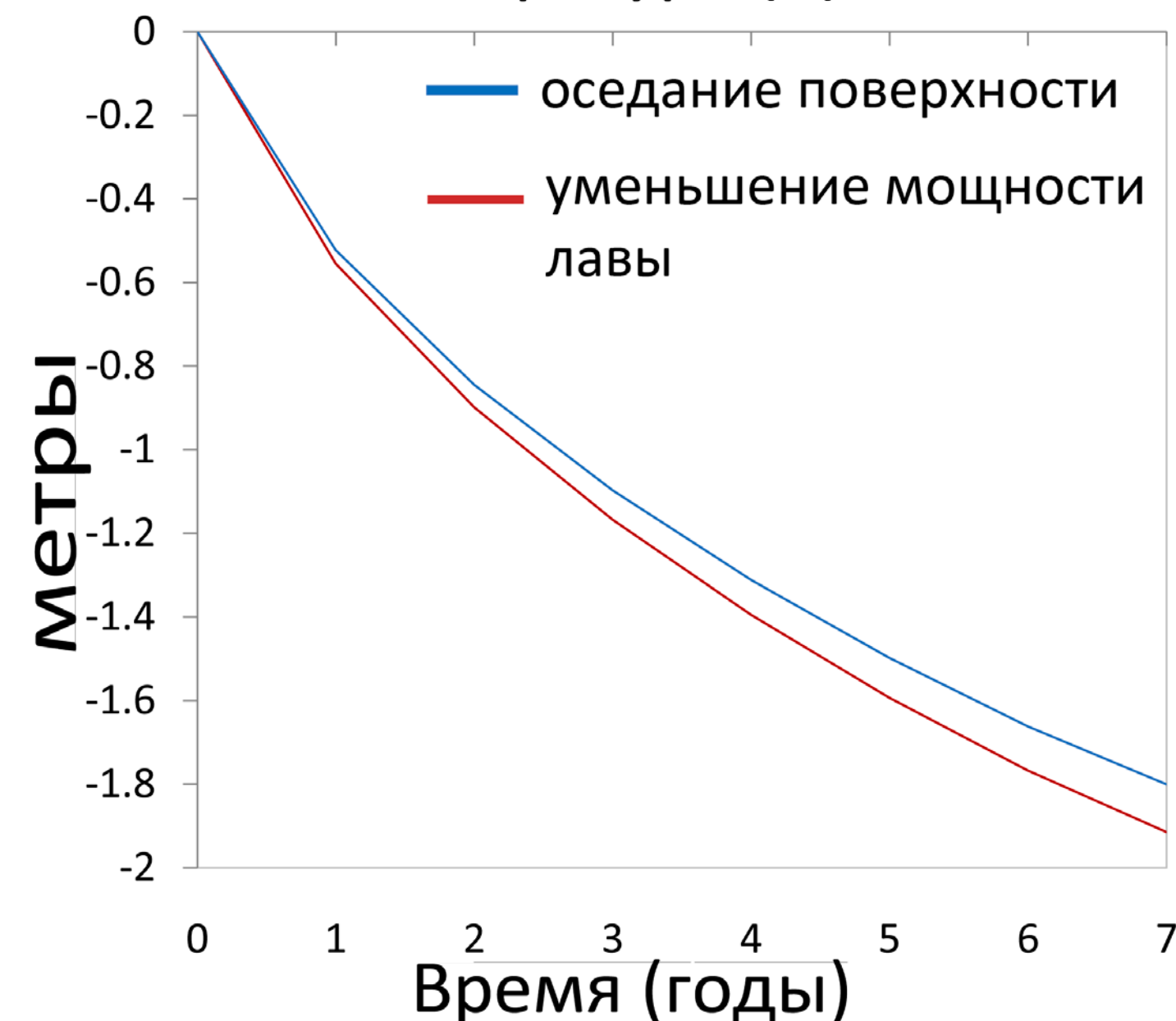
А – Температурные профили через 1, 3, 5 и 7 лет после извержения с "медленным" формированием слоя ($dh/dt=6\text{ м}$ через 20 дней) и $H_{\text{fin}} = 40\text{ м}$.



Б – Температурные профили через 7 лет после извержения для $H_{\text{fin}} = 40\text{ м}$ для разных сценариев: 1 – мгновенное формирование слоя лавы; 2 и 3 – «быстрое» и «медленное» наращивание слоя лавы соответственно



В – Температурные профили через 7 лет после извержения для разных толщин лавы: H_{fin} от 10 до 60 метров ($dh/dt = 6\text{ м}$ через 20 дней)



Г – Изменение во времени мощности лавы и оседания поверхности (красный и синий цвет соответственно) для слоя: $H_{\text{fin}} = 40\text{ м}$, $dh/dt=6\text{ м}$ через 20 дней. При расчётах учитывались пористость 10%, содержание стекла 20%

II. Термомеханическая модель процесса оседания поверхности лавового поля Толбачика

Выводы

- Интерферометрические оценки оседания поверхности лавовых потоков показали наличие двух различных типов характера оседания: "нормальный" и "аномальный".
- Более чем на 90% поверхности лавового поля соответствует "нормальной" скорости оседания и может быть хорошо объяснена термической моделью.
- Наилучшее соответствие данным РСА было достигнуто для медленно формирующегося слоя лавы ($dh/dt = 6$ м в течение 20 дней) с пористостью между 10-30% и содержанием стекла между 30-50%.
- Причины появления области "аномально" высоких скоростей оседания лавы в окрестности конуса Клешня заключаются в условиях формирования лавового потока. Эта часть потока, действительно, образовалась очень быстро после раскрытия трещины, что соответствует расчётам, основанным на сценариях "быстрого" или "мгновенного" образования слоя лавы, которые показывают значительно более высокие скорости оседания для слоев толщиной более 25 м.
- "Аномальные" точки с относительно небольшой мощностью не могут быть объяснены только термической моделью. Следует рассмотреть другие процессы: образование во время извержения в верхней части потока прямо под кратером Набоко системы лавовых труб и каналов. Во время извержения лава стекала во внешнюю часть поля, эти трубы быстро опустошались, что привело к образованию множества пустот, «лавовых пещер», над которыми, вероятно, картируются области аномально быстрого оседания.

III. Математическая модель формирования дайки в процессе извержения вулкана Корякский в 2008 – 2009 гг.



Фумаролы располагались по радиальной трещине на высоте 2850 м и 2950 м – с-з склон.

I часть исследователей.

Извержение фреатическое.

Активизация вызвана проникновением подземных вод в зону высоких температур.

Такое заключение сделано на основе результатов анализов пеплов извержения 2008-2009 гг. (Максимов и др., 2011)*.

II часть исследователей.

Активизация вулкана связана с процессами в магматическом очаге.

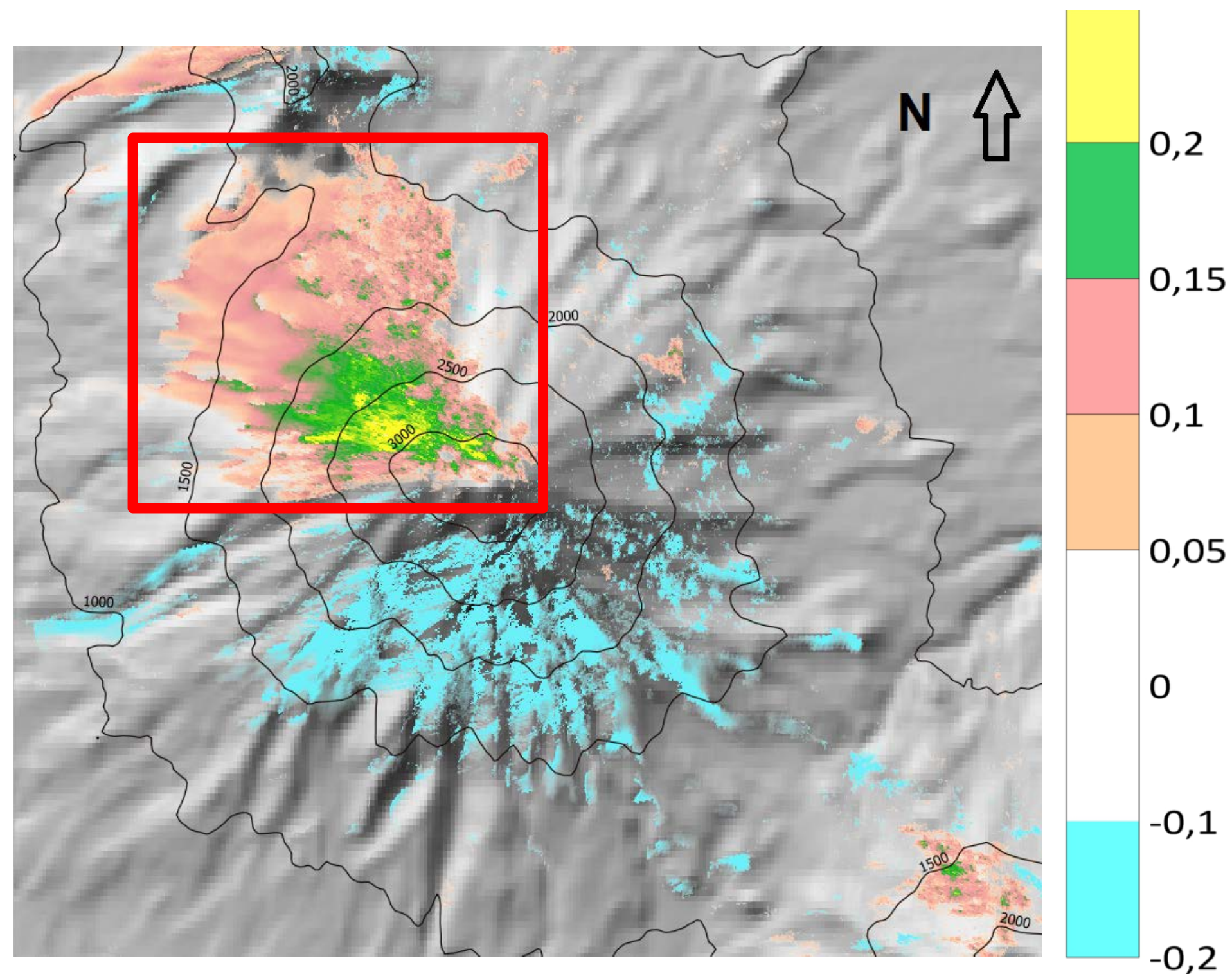
О чём свидетельствует анализ сейсмичности, который выявил последовательность кластеров землетрясений в широком диапазоне глубин (от -10 - 14 км глубины до +2 км в самой постройке) (Кирюхин и др., 2017; Иванов, 2010)*.

Кирюхин А. В., Федотов С. А., Кирюхин П. А., Черных Е. В.. Магматические питающие системы Корякско-Авачинской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и режима прилегающих термальных источников // Вулканология и сейсмология. 2017, №5. С. 3-17

Иванов, В. В. Активизация вулкана Корякский (Камчатка) в конце 2008—начале 2009 гг.: оценки выноса тепла и водного флюида, концептуальная модель подъема магмы и прогноз развития активизации // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский (30-31 марта 2009 г.) 2010. С. 24-38.

Максимов А. П., Аникин Л. П., Вергасова Л. П., Овсянников А. А., Чубаров В. М. Пеплы извержения Корякского вулкана (Камчатка) в 2009 г.: особенности состава и генезис // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле, 2011, №2. С. 73-86.

III. Математическая модель формирования дайки в процессе извержения вулкана Корякский в 2008 – 2009 гг.



Вулкан Корякский, цветная шкала – смещения в м (LOS) по снимкам ALOS-1 (16.08.2007 – 06.10.2009); основа – теневой рельеф (SRTM3).

I. Пепел?

Известно, что (Максимов и др, 2011; Гирина и др., 2010)* :

а) пеплы лежали отдельными пятнами на снегу;

б) мощность пепловых отложений составляла первые сантиметры;

II. С другой стороны...

а) Суммарный объём полученных по DInSAR смещений

$$V = 1.3 \cdot 10^6 \text{ м}^3$$

б) (Гордеев, Дроздин, 2010)* – оценка термальной энергии извержения (10^9 МДж). Соответствует кристаллизации магмы объёмом $V = 10^6 \text{ м}^3$.

в) (Кирюхин и др., 2017)* – моделирование инъекции магмы в трещину. Получена величина раскрытия трещины объёмом $V = 1.2 \cdot 10^6 \text{ м}^3$.

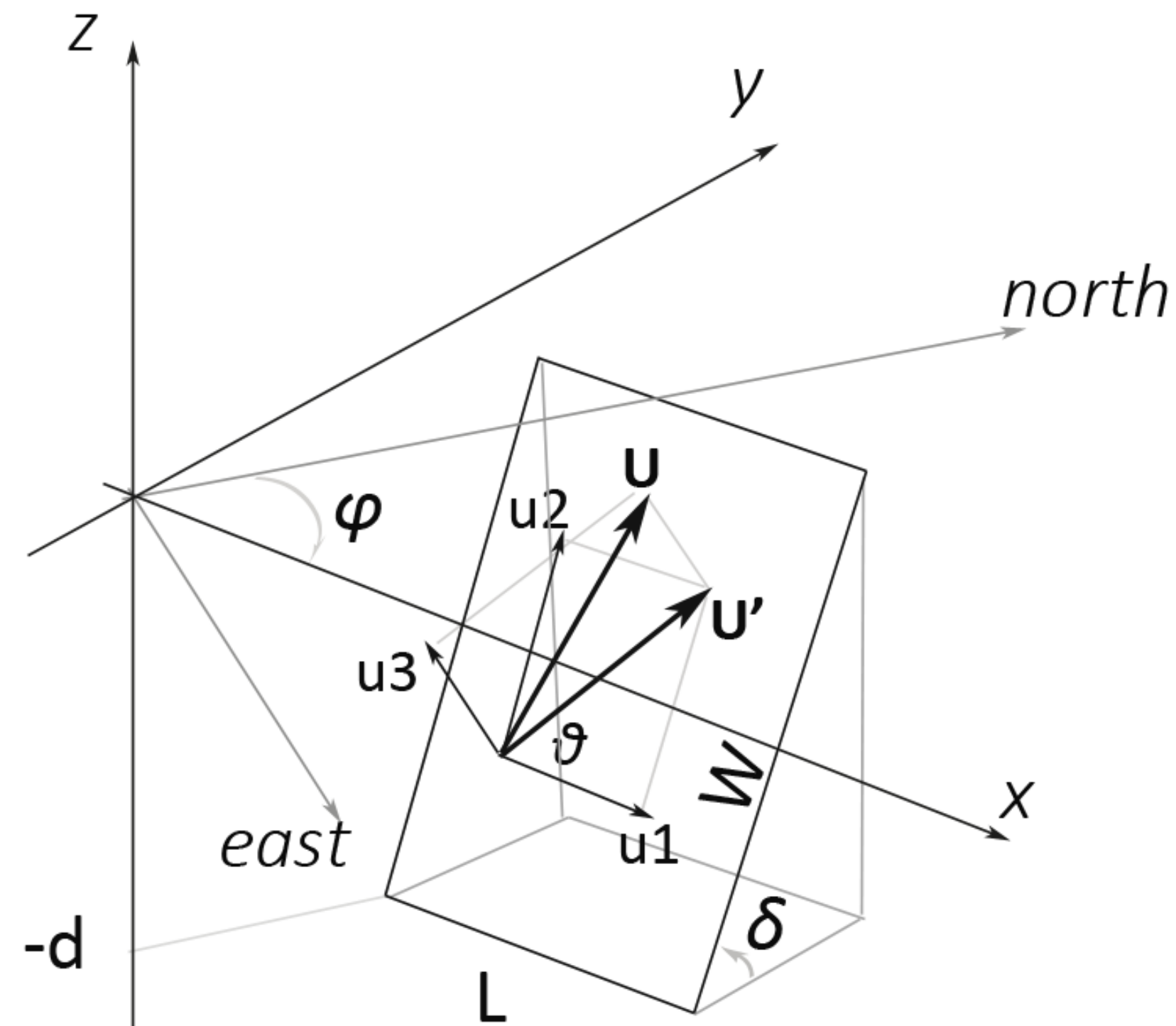
Максимов А. П., Аникин Л. П., Вергасова Л. П., Овсянников А. А., Чубаров В. М. Пеплы извержения Корякского вулкана (Камчатка) в 2009 г.: особенности состава и генезис // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле, 2011, №2. С. 73-86.

Гирина О. А., Маневич А. Г., Мельников Д. В., Нуждаев А. А., Ушаков С. В., Коновалова О. А. Активность вулкана Корякский с октября 2008 г. по октябрь 2009 г. по данным KVERT // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский (30-31 марта 2009 г.). 2010. С. 15-23.

Кирюхин А. В., Федотов С. А., Кирюхин П. А., Черных Е. В.. Магматические питающие системы Корякско-Авачинской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и режима прилегающих термальных источников // Вулканология и сейсмология. 2017, №5. С. 3-17.

Гордеев Е. И., Дроздин В. А. Температура эксплозивного шлейфа извержения вулкана Корякский в 2009 г. // Доклады Академии наук, (2010). т. 430 (3), С. 349-351.

Модель Окада



Углы направлений подвижки

$\delta = 45\text{--}80^\circ$ (dip, угол падения)

$\varphi = 133.03^\circ$ (strike, угол простирания)

Линейные размеры по простиранию и падению

$L = 1.0$ км

$W = 2.4$ км,

$d = 0.5$ км – глубина залегания дайки

$(x, y) = (158.696, 53.328)$.

Вектор смещений

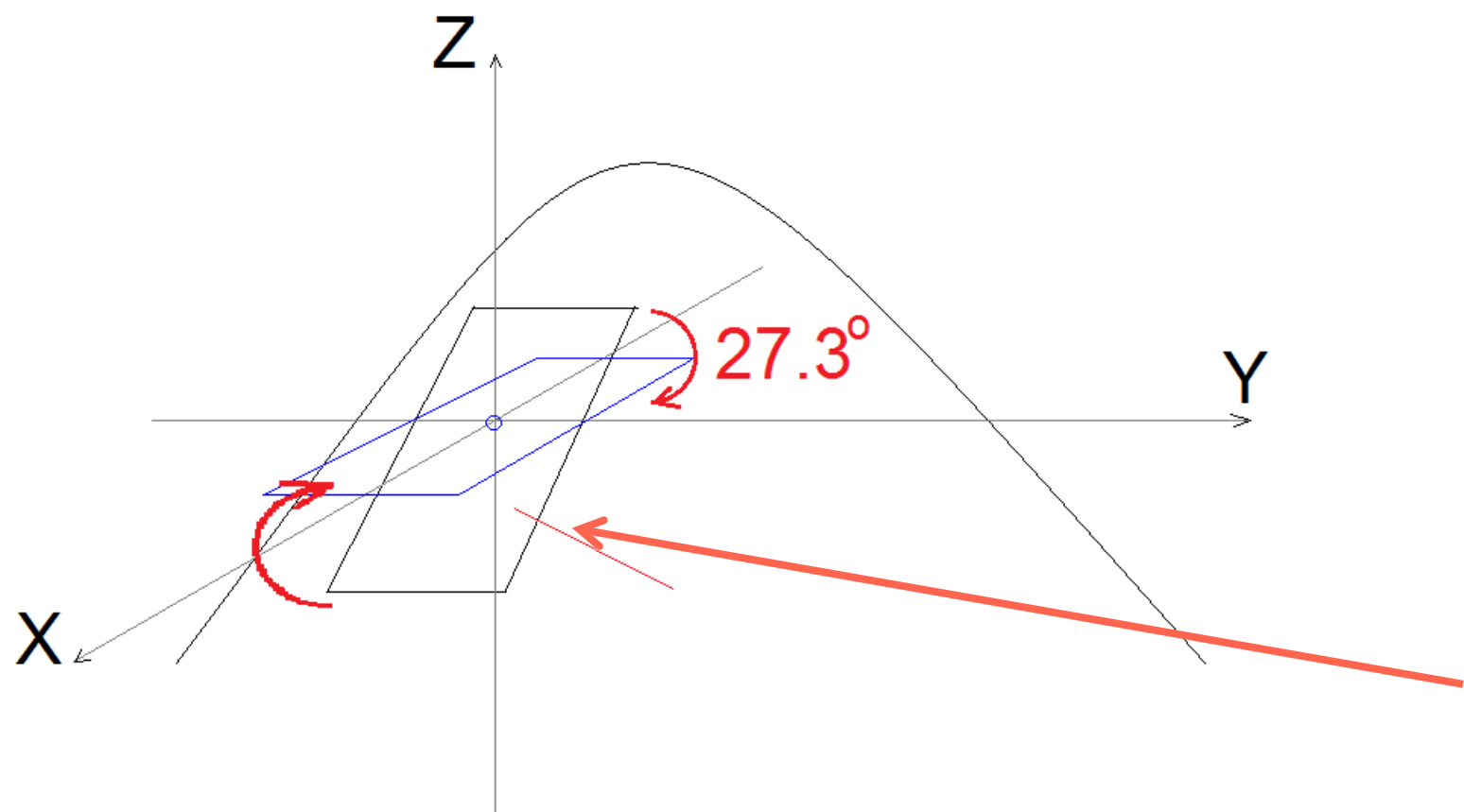
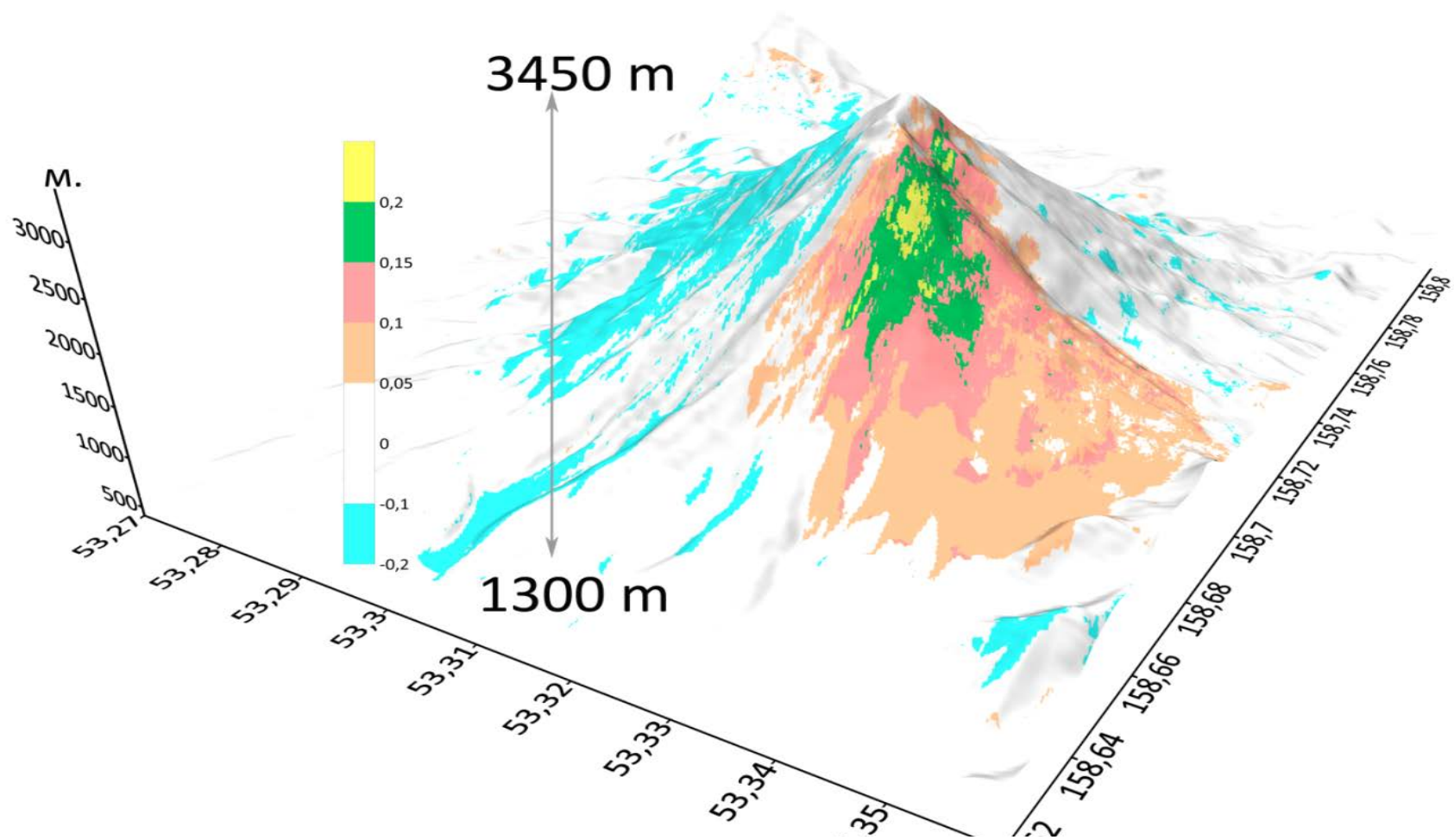
$u_1 = 0$; сдвиг параллельно простиранию (strike-slip)

$u_2 = ?$; сброс параллельно падению (dip-slip)

$u_3 = ?$; раздвиг (tensile)

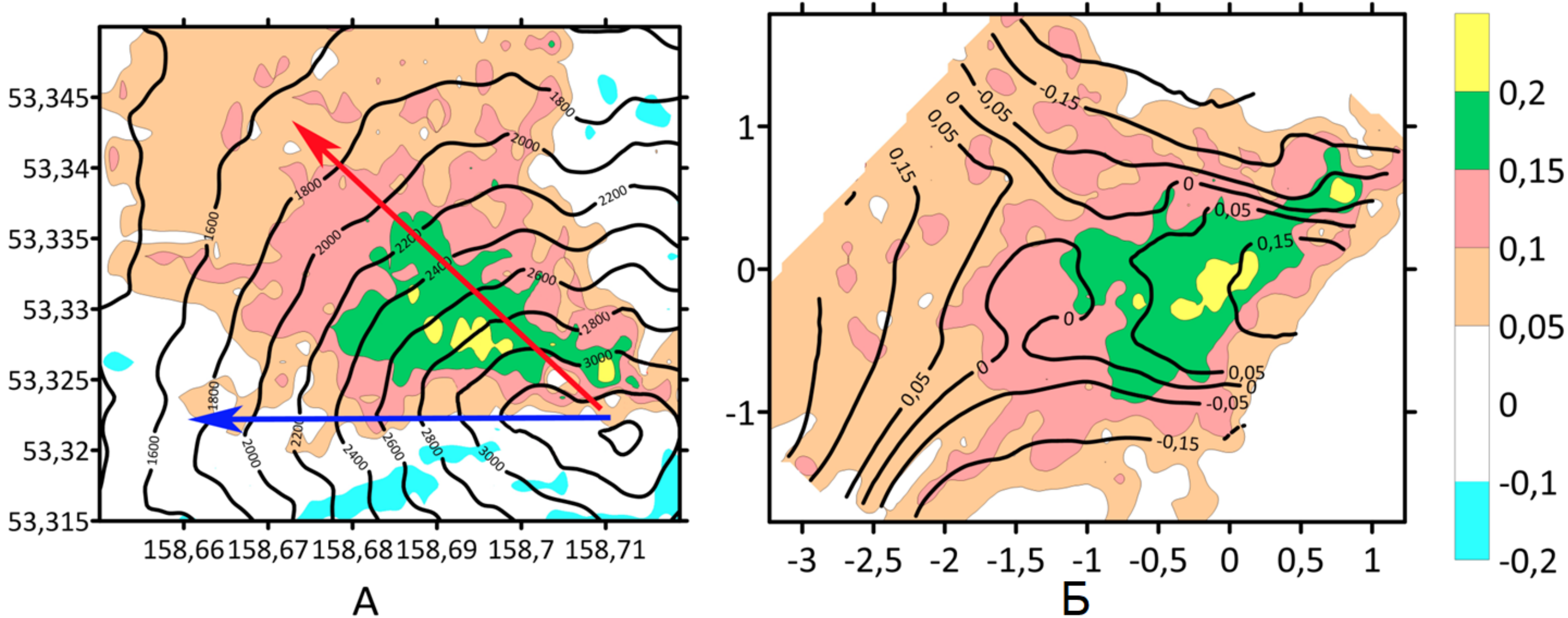
III. Математическая модель формирования дайки в процессе извержения вулкана Корякский в 2008 – 2009 гг.

Перепад высот в области смещений 2 км 150 м.



Трансформации системы координат

1) - поворот координат вокруг оси Oz



Цветная шкала – смещения по InSAR в метрах.

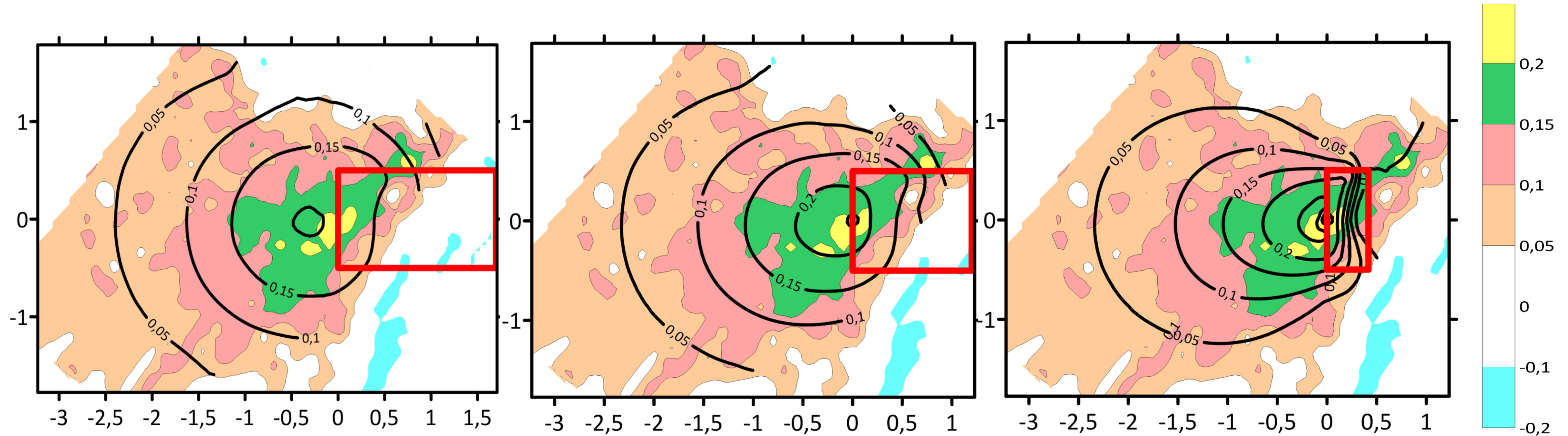
А) Карта в географических координатах, изолинии – высота н.у.м. (м).

Б) Карта в локальных декартовых координатах после вычитания аппроксимирующей локальный рельеф плоскости и поворота вокруг оси Oz; изолинии – высота рельефа над аппроксимирующей плоскостью в км.

2) - поворот координат вокруг оси Oy так, чтобы плоскость, аппроксимирующая рельеф, была перпендикулярна оси Oz.

III. Математическая модель формирования дайки в процессе извержения вулкана Корякский в 2008 – 2009 гг.

Модель дайки в вулканической постройке вулкана Корякский



Угол падения = 45°
мощность дайки = 82 см;
 $V = 2.0 \cdot 10^6 \text{ м}^3$

Угол падения = 60°
мощность дайки = 71 см;
 $V = 1.7 \cdot 10^6 \text{ м}^3$

Угол падения = 80°
мощность дайки = 64 см;
 $V = 1.536 \cdot 10^6 \text{ м}^3$

Цветная шкала – смещения в направлении на спутник (метры).

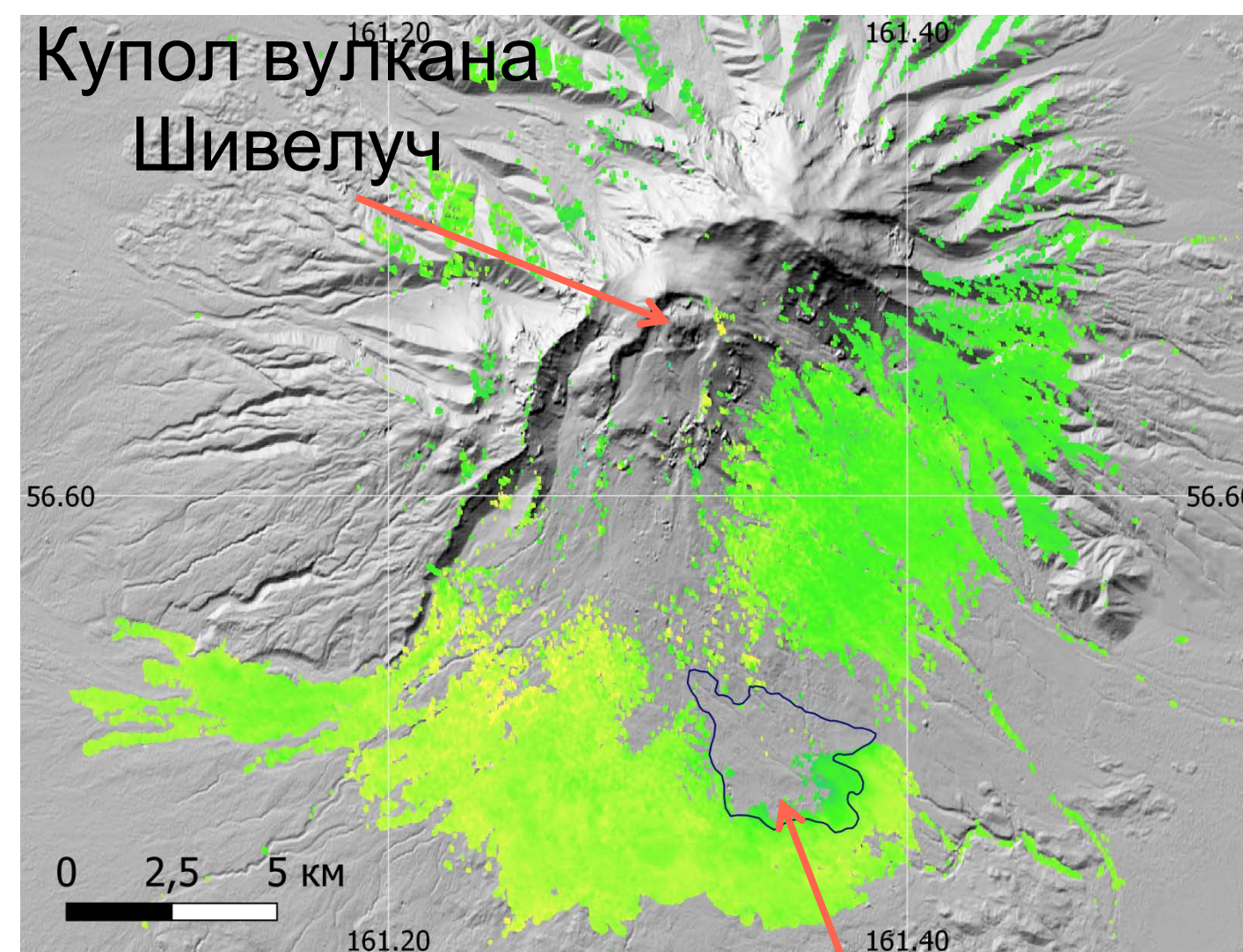
Изолинии – расчётные смещения (метры), пересчитанные в направлении на спутник (LOS).

Выводы

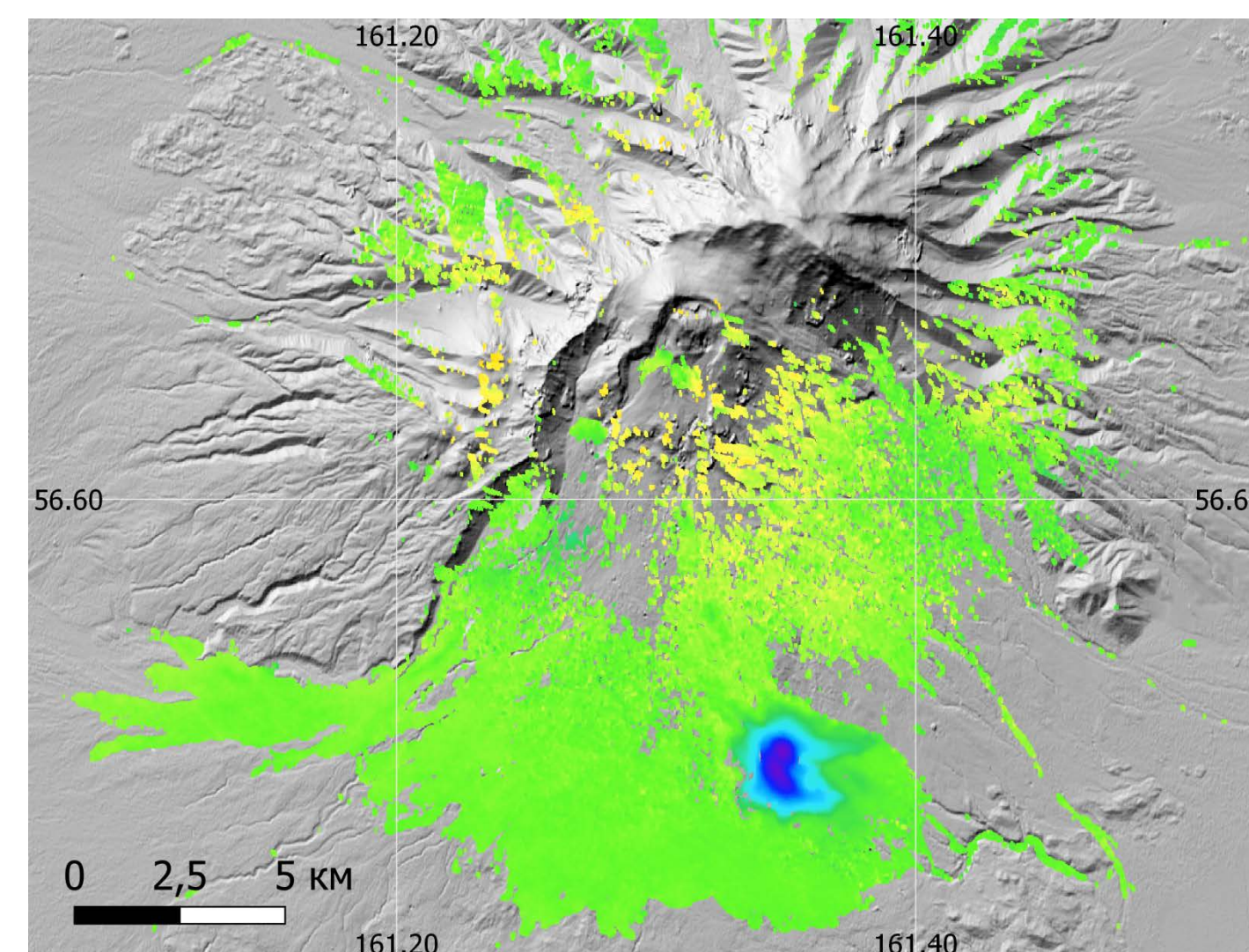
- Смещения поверхности вулкана Корякский, полученные методами РСА интерферометрии, превосходят 25 см и не могут быть объяснены слоем пепловых отложений, сформированным в период извержения 2008–2009 гг. Склоновые процессы и таяние ледника должны были привести к смещениям противоположного знака. Следовательно, наиболее вероятной причиной смещений следует признать внедрение магматического материала в постройку вулкана. На это указывают также данные анализа сейсмических каталогов и тепловизионных исследований.
- Модель дайки с глубиной нижней кромки 0.5 км над уровнем моря, шириной по простиранию 1.0 км, по падению 2.4 км, с углом падения от 45 до 60° хорошо соответствует смещениям, определенным по РСА интерферометрии. Объем трещины согласуется с оценками работы [Кириухин и др., 2017], описывающей моделирование инъекции магмы в трещину, а так же с оценками в работе [Гордеев, Дроздин, 2010], где были выполнены расчёты энергии извержения. Все результаты соответствуют объёму магмы по порядку величины равной 10^6 м³. В нашей модели глубина трещины может быть увеличена на 1 км при соответствующем уменьшении ее геометрических размеров.
- Поскольку подтверждается гипотеза о том, что активизация вулкана Корякский была связана с подъемом вулканического материала и его внедрением, в том числе, в вулканическую постройку самого вулкана, следовательно происходящие под вулканом процессы могут создавать опасность для расположенных в его окрестности населенных пунктов и объектов инфраструктуры и требуют непрерывного мониторинга.

IV. Термомеханическая модель остывания пирокластического потока, сформированного в результате извержения 29.08.2019 г. вулкана Шивелуч

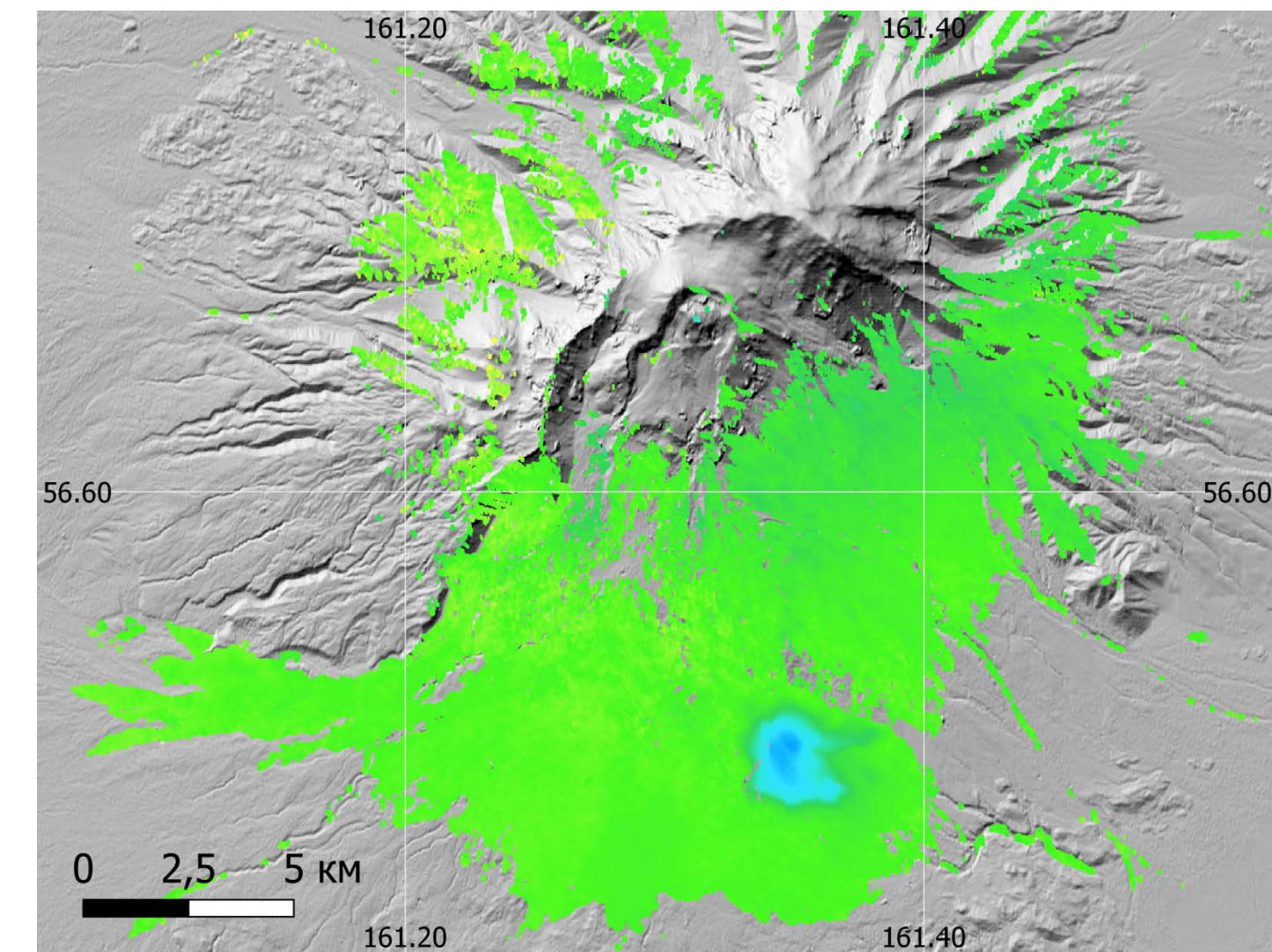
Карты средних скоростей смещений по снимкам Sentinel-1A, 2019, 2020, 2021 гг. (в направлении на спутник)



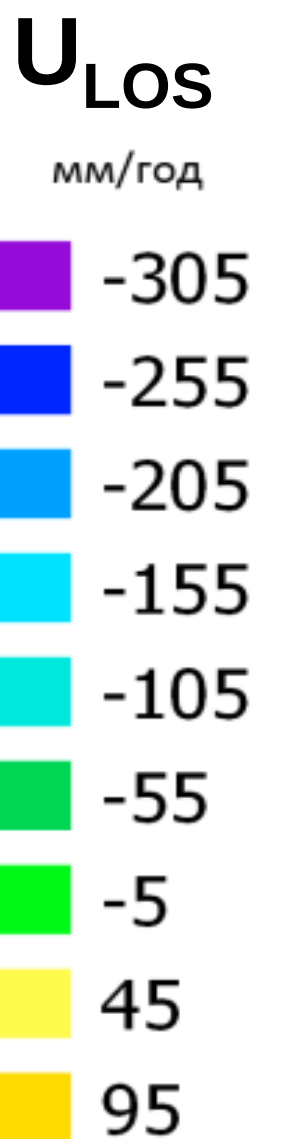
28.05. – 07.10.2019 (12 снимков)



22.05. – 13.10.2020 (13 снимков)
Субвертикальные смещения 385 мм

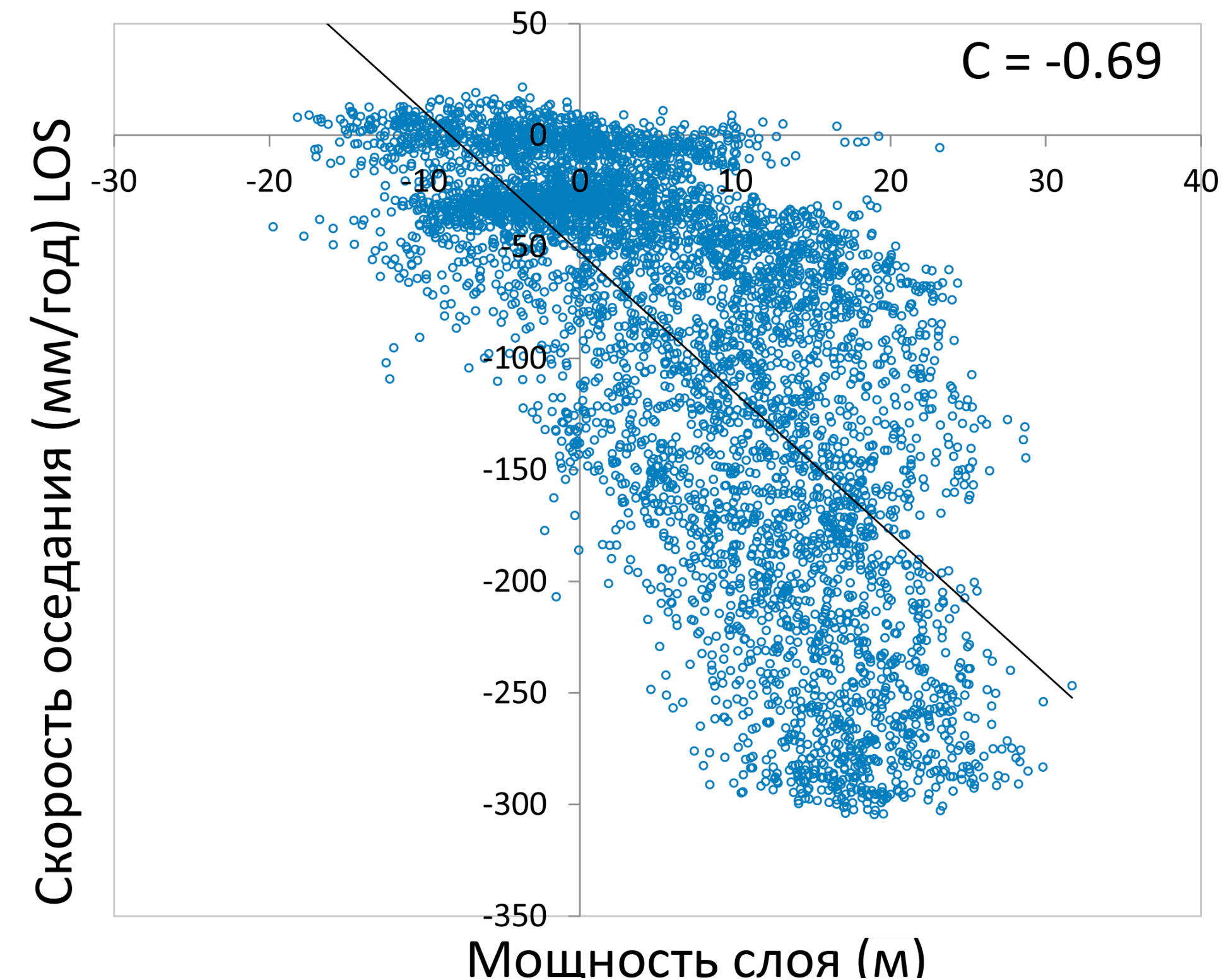
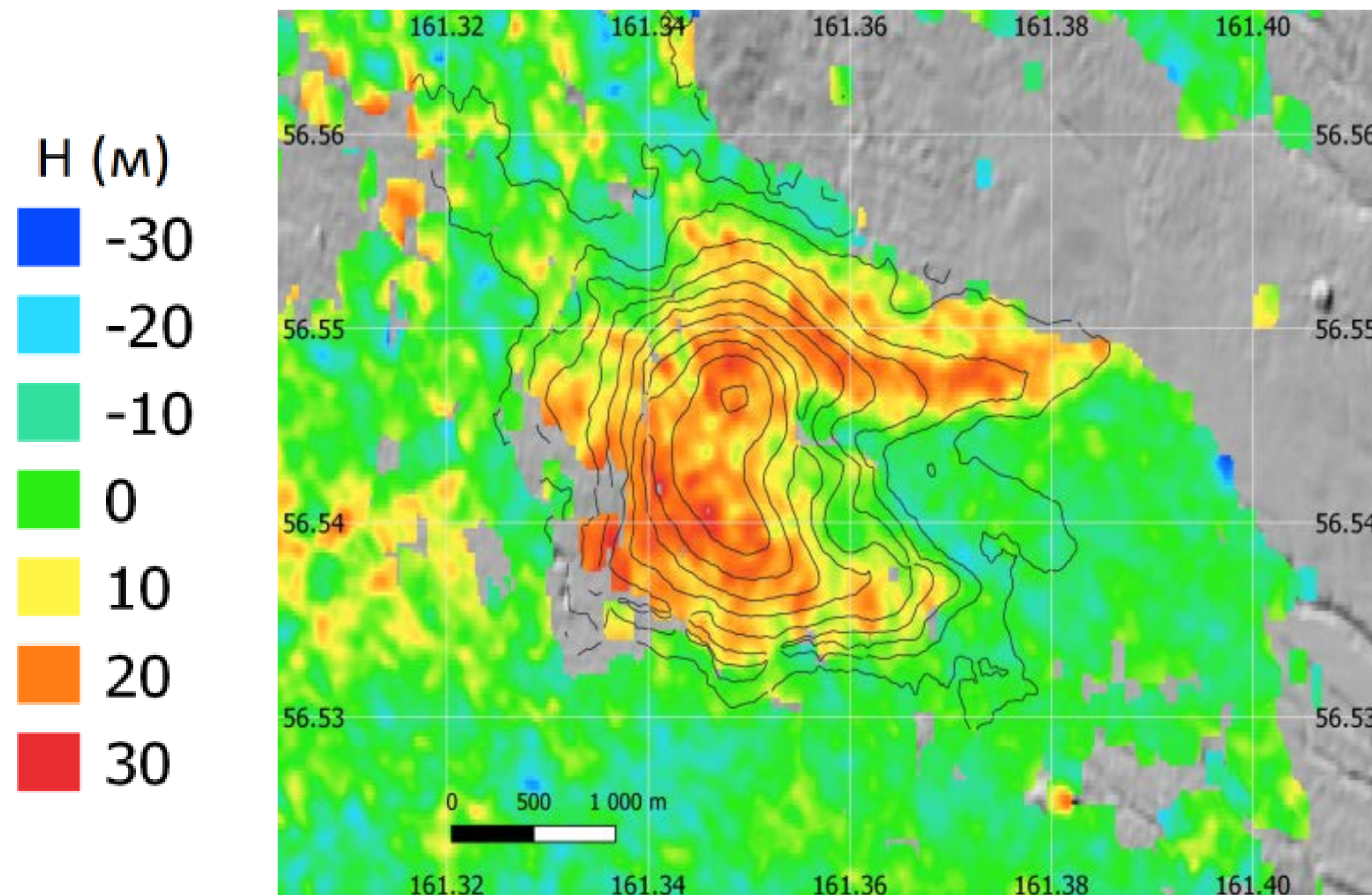


05.05. – 08.10.2021 (14 снимков)
Субвертикальные смещения 257 мм



Отложения
пирокластического
потока

IV. Термомеханическая модель остывания пирокластического потока, сформированного в результате извержения 29.08.2019 г. вулкана Шивелуч



Карта мощности пирокластического потока, полученная по разности ЦМР 2018 и 2020 гг. (слева).

Коэффициент корреляции данных скорости оседания (2020 г) и мощности = -0.69;
При этом наблюдается существенная дисперсия относительно линейного тренда (справа).

IV. Термомеханическая модель остывания пирокластического потока, сформированного в результате извержения 29.08.2019 г. вулкана Шивелуч

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{term} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + W(z, t) \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$T(z, t = 0) = \begin{cases} T_{pyr}; & \text{при } z = [-H(t); 0]; \\ dT_0 * z; & \text{при } z = (0; H_{max}]; \end{cases}$$

$$T(z, t > 0) = \begin{cases} 0; & \text{при } z = -H(t); \\ dT_0 * z; & \text{при } z = H_{max}; \end{cases}$$

где $T(z, t)$ и $W(z, t)$ – температура и скорость оседания материала;

$H(t)$ – мощность пирокластических отложений;

H_{max} – глубина нижней границы модели;

T_{pyr} – начальная температура материала;

dT_0 – градиент температуры в грунте 25 °C/км;

$k_{term} = \lambda / (\rho(t) * c_p)$ – температуропроводность;

λ – теплопроводность;

$\rho(t) = \rho(t, T) = \rho_0 * (1 - \alpha * (T(t) - T_0))$ – плотность;

c_p – удельная теплоёмкость.

k_0 – пористость при $t \rightarrow \infty$, где t – время.

Тогда $\bar{k} = k_0 + \Delta k$ – средняя начальная пористость в момент времени $t = 0$,

Δk – суммарное изменение пористости;

$k(t) = k_0 + \Delta k * e^{-t/a}$

 – пористость в момент времени $t > 0$.

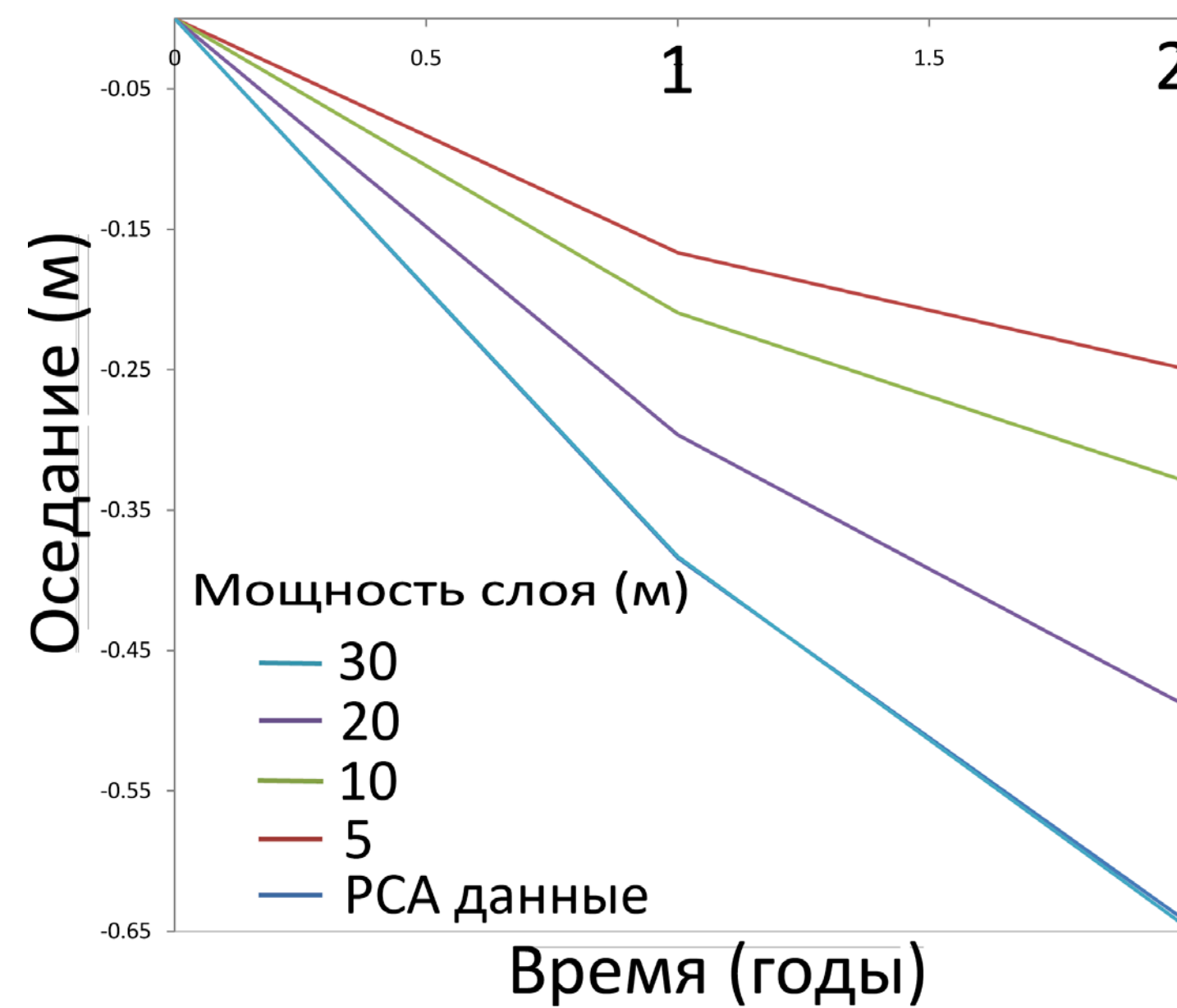
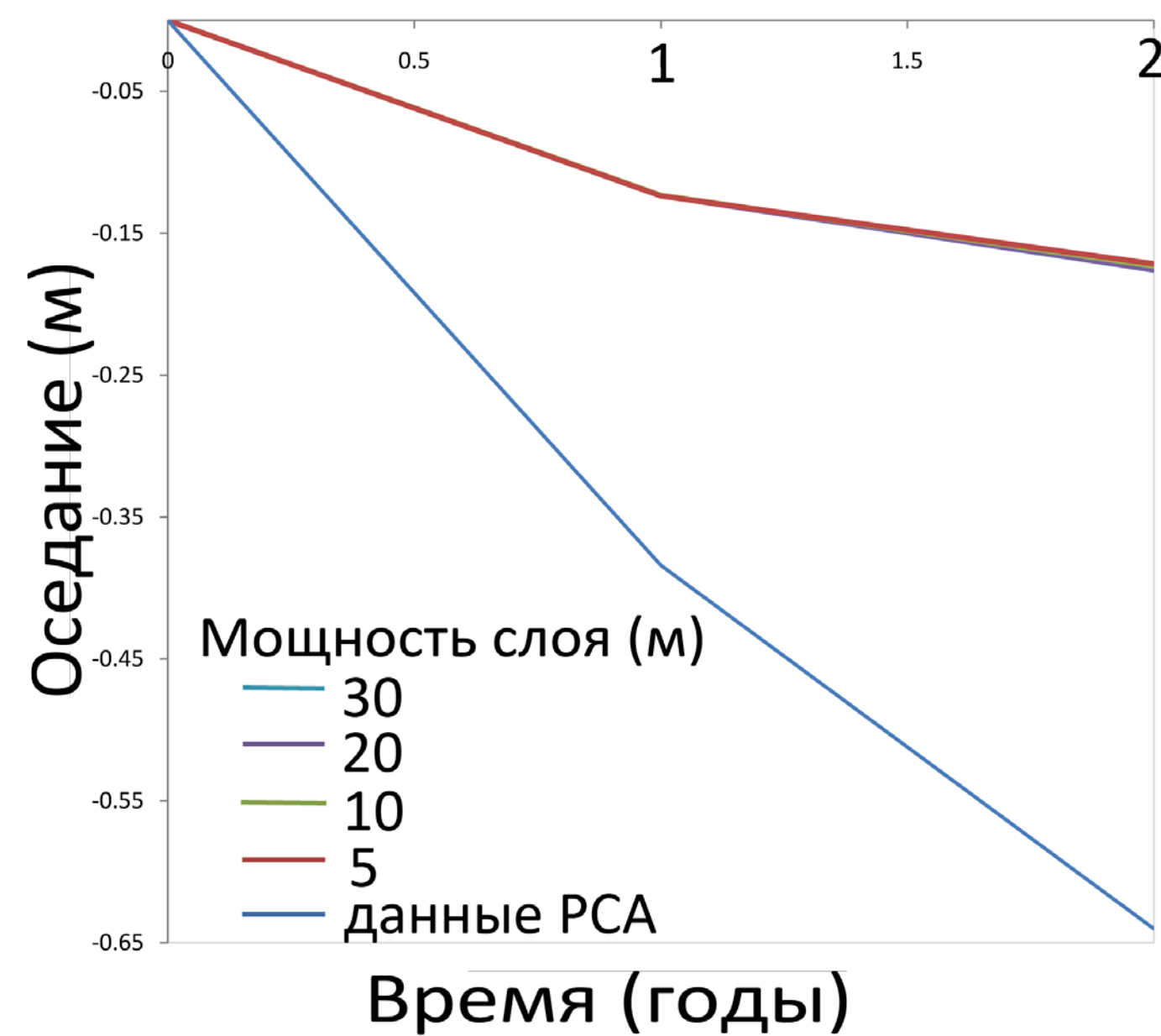
Деформация ячейки сетки за счёт уплотнения среды

$$\Delta z(t) = \delta z(t) * \frac{(1 - \bar{k})}{(1 - k(t))}.$$

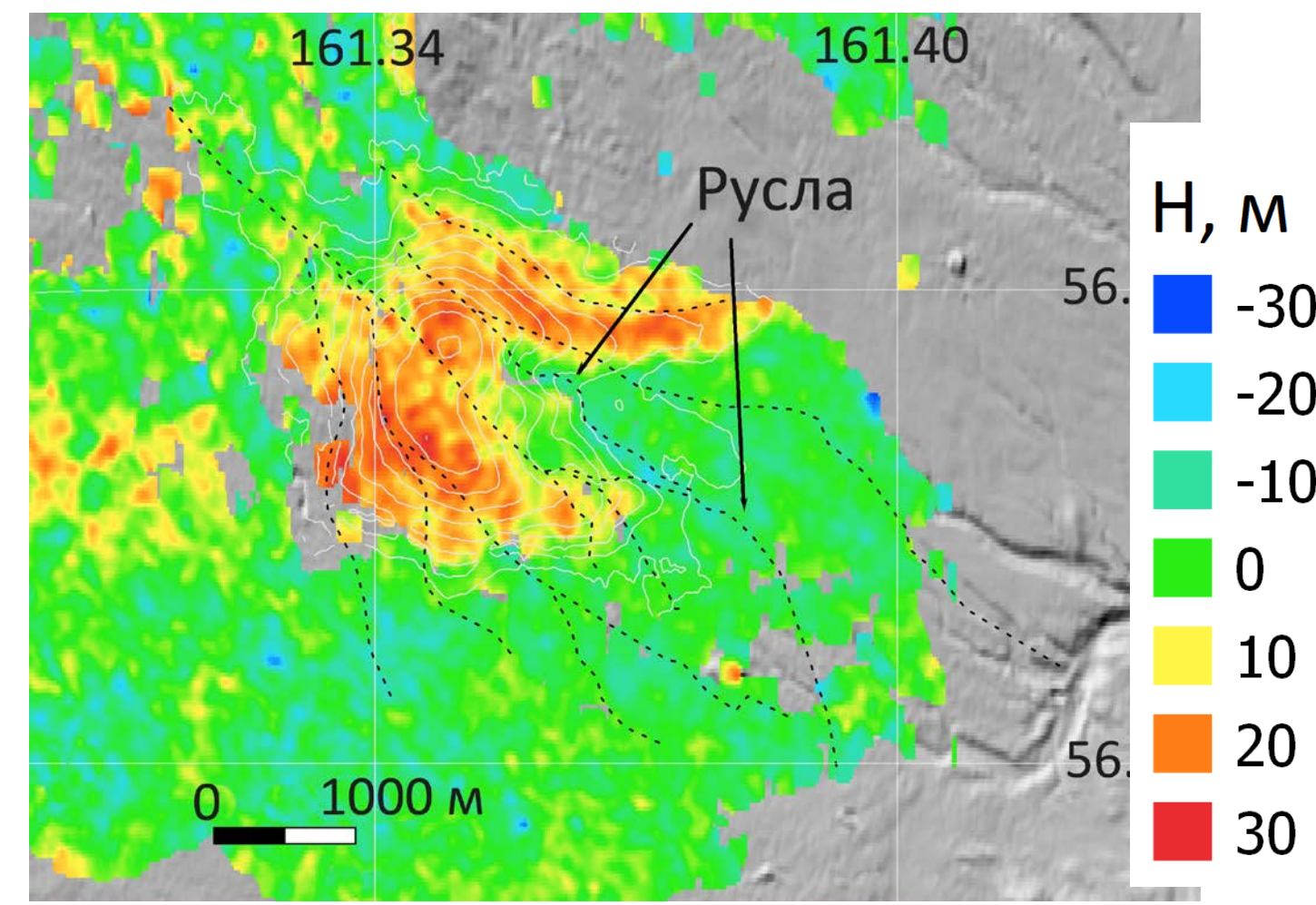
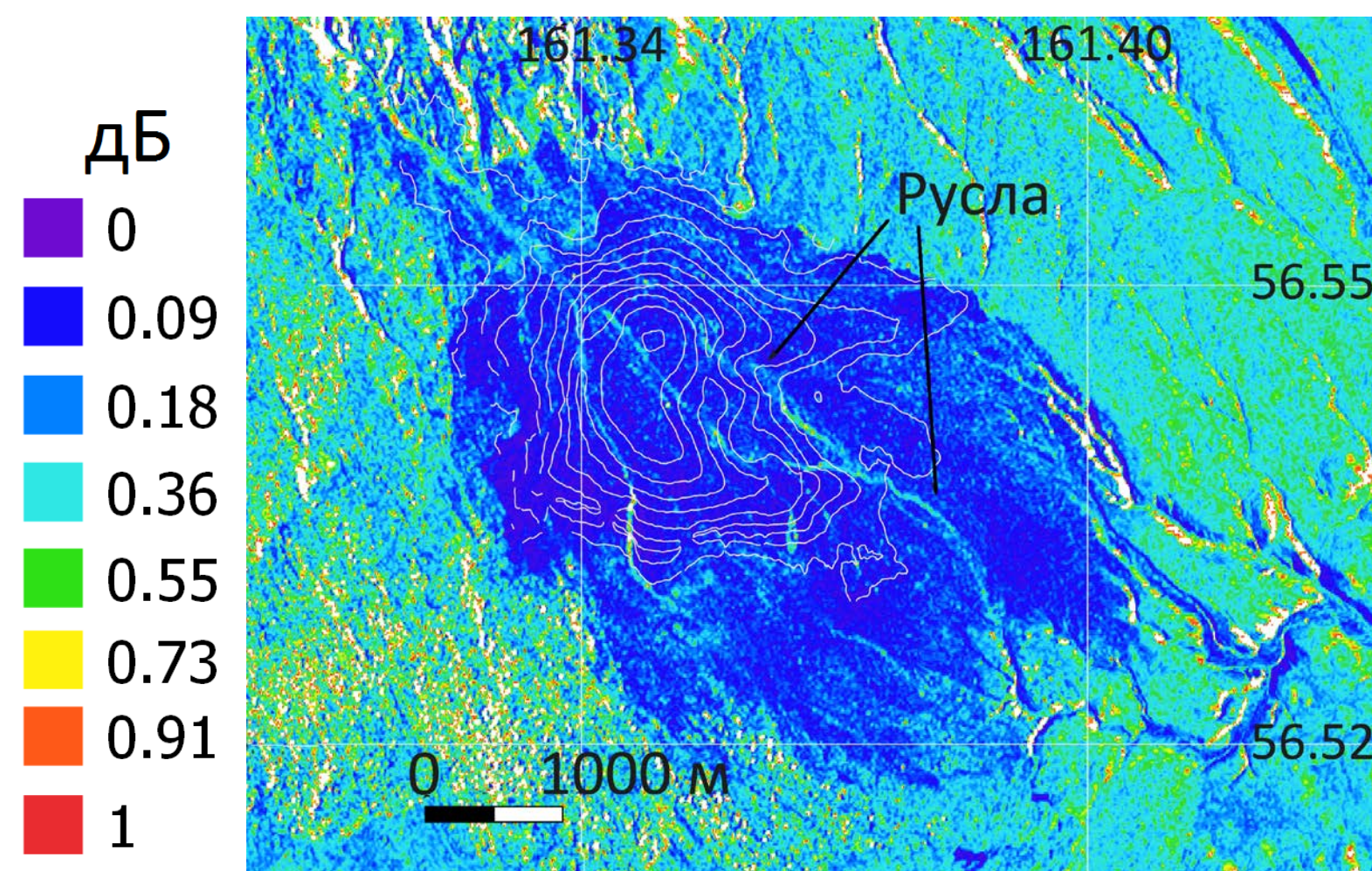
$$\delta z(t) = \Delta z_0 (1 + \alpha (T - T_0))$$

Физическая величина	Значение
ρ_0 , г/см ³	2.4
T, °C	850 (горячий поток) 400 (холодный поток)
λ , Вт/(мК)	1.1
c_p , Дж/(кг·К)	10 ³ (лава) 1.4·10 ³ (грунт)
α	3.4·10 ⁻⁵
k_0	0.5
Δz_0 , м	0.1
τ , дни	0.5

IV. Термомеханическая модель остывания пирокластического потока, сформированного в результате извержения 29.08.2019 г. вулкана Шивелуч



Накопленное оседание пирокластических отложений за счёт остывания материала потока (слева);
за счёт охлаждения и компакци (справа), $dk = 0.023$ (суммарное изменение пористости).



Слева – амплитудное изображение, среднее по снимкам Сентинель-1А за период 2020–2021 гг.
Справа – карта мощности слоя пирокластических отложений извержения 29.08.2019 года.
Чёрный пунктир – следы поверхностных потоков, оцифрованные по амплитудному изображению.

IV. Термомеханическая модель остывания пирокластического потока, сформированного в результате извержения 29.08.2019 г. вулкана Шивелуч

Выводы

- Снимки спутника Сентинель-1А позволили оценить мощность пирокластического потока и скорость оседания его поверхности. Карты скоростей смещений поверхности вулкана, построенные по данным РСА-интерферометрии по сериям снимков спутника Сентинель-1А за 2020 и 2021 годы в периоды с мая по октябрь, показывают оседания в области пирокластического потока с максимальной скоростью в 2020 году равной 385 мм/год, в 2021 году равной 257 мм/год. Мощность пирокластических отложений, оцененная по тем же снимкам, достигает 30 м.
- Для исследования процесса оседания построена термомеханическая модель, в которой учтена компакция отложений за счёт изменения во времени их пористости. Сопоставление расчётных и реальных данных показало, что для объяснения зависимости скорости оседаний поверхности потока от мощности пород, достаточно предположить небольшое изменение пористости с 2019 по 2021 гг., которое в зависимости от начальной температуры потока составило от 1.5 до 1.7%.
- Разброс зависимости скорость оседаний – мощность потока объясняется процессами размыва пирокластических отложений. Следы многочисленных потоков хорошо видны на спутниковых снимках. Их положение согласуется с картой мощности потока, построенной по данным спутниковой РСА интерферометрии.

Практическая значимость сделанной работы:

1. Разработана технология обработки РСА снимков, эффективная в условиях полуострова Камчатка, даны методические рекомендации применения спутниковых технологий в горных районах с экстремальными климатическими условиями и в условиях северных широт. По результатам применения методики получены поля смещений на склонах вулканов Плоский Толбачик, Корякский и Шивелуч.
2. Модель остывания Толбачинского лавового поля объясняет процессы, участвовавшие в формировании различных частей лавового потока, даёт оценку различия физических свойств лавы (содержания пор и стёкол). Сопоставление реальных и расчётных скоростей оседания позволяет картировать лавоводы и лавовые каналы.
3. Модель внедрения дайки в постройку Корякского вулкана подтверждает гипотезу подъёма магмы во время извержения 2008–2009 гг. Следовательно, происходящие под вулканом процессы могут создавать опасность для расположенных в его окрестности населенных пунктов и объектов инфраструктуры и требуют непрерывного мониторинга, в том числе с применением спутниковых технологий.
4. Предложенная термомеханическая модель позволяет оценить физические параметры пирокластического потока на вулкане Шивелуч и объясняет механизм вертикальной деформации при его остывании.

Научная новизна сделанной работы:

1. Разработана и обоснована путем массового тестирования на снимках С и L диапазона технология обработки РСА снимков, эффективная в условиях полуострова Камчатка.
2. По РСА снимкам спутника Sentinel-1 за 2019 год впервые определены скорости оседания поверхности лавового потока, сформированного в результате извержения вулкана Плоский Толбачик в 2012–2013 г методом SBAS.
3. Для интерпретации поля смещений построена новая математическая модель остывания лавового потока, которая учитывает скорость формирования толщины лавового слоя и определенные по составу лав вулкана Плоский Толбачик скрытую теплоту кристаллизации, зависимости теплоёмкости, теплопроводности и плотности от температуры, температурную зависимость концентрации кристаллов в объёме расплава и процент незакристаллизованного материала (стекло или расплав), пористость.
4. По снимкам спутника ALOS-1 (L диапазон), впервые определены смещения поверхности вулкана Корякский в результате извержения 2008–2009 гг, которые превосходят 25 см.
5. Интерпретация данных о смещениях поверхности вулкана Корякский выполнена в рамках модели внедрения дайки в вулканическую постройку, основанной на решении Окада [Okada, 1985; 1992]. Расчетный объем дайки согласуется с оценками работы [Кирюхин и др., 2017], описывающей моделирование инжекции магмы в трещину, а также с оценками в работе [Гордеев, Дроздин, 2010], в которой были выполнены расчёты энергии извержения. Все результаты соответствуют объёму магмы по порядку величины равной 10^6 м^3 . Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что извержения Корякского вулкана 2008–2009 гг. сопровождалось внедрением магмы в вулканическую постройку (глава 3).
6. По снимкам спутника Sentinel-1A впервые определена скорость оседаний слоя пирокластических отложений на вулкане Шивелуч, сформировавшихся во время извержения 29.08.2019 года. В 2020 году субвертикальная скорость оседаний достигала 385 мм/год, в 2021 году – 257 мм/год. Карта мощности потока, впервые получена по РСА снимкам спутника Sentinel-1A. Мощность пирокластических отложений достигает 30 м.
7. Для исследования процесса оседания пирокластического потока построена термомеханическая модель остывания потока, в которой учтена компакция отложений за счёт изменения во времени их пористости и плотности.

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК, WoS, Scopus:

1. Михайлов В.О., **Волкова** М.С., Тимошкина Е.П., Шапиро Н.М., Бабаянц И.П., Дмитриев П.Н., Хайретдинов С.А., Анализ смещений поверхности лавовых потоков Толбачинского трещинного извержения 2012–2013 г. методами спутниковой радарной интерферометрии // Геофизические исследования. 2020. Т. 21, № 4. С.21–34. doi.org/10.21455/gr2020.4-2
2. Михайлов В.О., **Волкова** М.С., Тимошкина Е.П., Шапиро Н.М., Смирнов В.Б.; О связи активизации вулкана Корякский в 2008–2009 гг. с глубинными магматическими процессами // Физика Земли. 2021. № 6. С. 3-9.
(Mikhailov, V.O., **Volkova**, M.S., Timoshkina, E.P. et al. On the Connection between the 2008–2009 Activation of the Koryakskii Volcano and Deep Magmatic Processes. Izv., Phys. Solid Earth 57, 819–824 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1069351321060045>)
3. **Волкова** М.С., Михайлов В.О., Модель оседания поверхности пирокластического потока: вулкан Шивелуч, извержение 29.08.2019 г. // Геофиз. исследования. №2, 2022. С. 73-84. doi.org/10.21455/gr2022.2-5
4. **Volkova** M.S., Shapiro N.M., Melnik O.E., Mikhailov V.O., Plechov P.Yu., Timoshkina E.P., Bergal-Kuvikas O.V., Subsidence of the lava flows emitted during the 2012–2013 eruption of Tolbachik (Kamchatka, Russia): Satellite data and thermal model // Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 427, 2022, 107554, ISSN 0377-0273, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107554>.

Публикации в сборниках и материалах конференций:

1. **Волкова** М.С., Михайлов В.О., Тимошкина Е.П., Шапиро Н.М., Бабаянц И.П., Дмитриев П.Н., Хайретдинов С.А., Опыт применения спутниковой радарной интерферометрии для изучения вулканических процессов на Камчатке. Материалы Восемнадцатой Всероссийской Открытой конференции с международным участием «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 16–20 ноября 2020. ИКИ РАН, 2020. С. 74. DOI 10.21046/18DZZconf-2020a.
2. Михайлов В.О., **Волкова** М.С., Тимошкина Е.П., Шапиро Н.М., Смирнов В.Б. Возможные причины активизации вулкана Корякский в 2008-2009 г по данным спутниковой радарной интерферометрии. 19-я Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» ИКИ РАН 15 – 19 ноября 2021 г. РИНЦ.
3. Mikhailov V., **Volkova** M, Timoshkina E., Shapiro N., Timofeeva V. Investigation of tectonic processes in Kamchatka using SAR interferometry. Joint PI Meeting of JAXA Earth Observation Missions FY2020 18-22 January 2021 presentation AT-106.
4. Mikhailov V., **Volkova** M., Timofeeva V., Shapiro N., Timoshkina E., Senyukov S., Dmitriev P., Babayants I. SAR Monitoring of Seismic and Volcanic Events in the Kamchatka Peninsula (Стендовый) FRINGE 2021, Online, Нидерланды, 31 мая - 4 июня 2021
5. Mikhailov V., **Volkova** M., Timoshkina E., Shapiro N., Smirnov V., Dmitriev P., Babayantz I. Subsidence of the lava flow formed during 2012-2013 Tolbachik fissure eruption: SAR data and thermal model (Устный) EGU 2021, Вена, Австрия, 19-30 апреля 2021