

**Вклад научной школы к.ф.-м.н. П.И. Токарева в развитие методов прогноза вулканических извержений и изучение их механизмов**

**Иванов В.В.**

**Contribution of the scientific school by Ph.D. P.I. Tokarev to the development of methods for predicting volcanic eruptions and studying their mechanisms**

**Ivanov V.V.**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;  
e-mail: victorvasilievich53@gmail.com*

В связи со 100-летним юбилеем заведующего лабораторией прогноза и механизма извержений Института вулканологии ДВО РАН, председателя рабочей группы Международной ассоциации вулканологии и химии недр земли П.И. Токарева (21.06.2023 г.), рассмотрен вклад его научной школы в развитие прогнозной тематики, отечественной и мировой вулканологии.

**Введение**

Прогноз места, времени начала и масштаба извержений вулканов имеет целью снижение вулканического риска для населения и народного хозяйства, а также своевременную подготовку к его изучению. Прогнозирование основано на фундаментальном изучении магматических и вулканических процессов (*механизмов извержений*) и предполагает создание соответствующих наблюдательных сетей, оперативных служб, методик мониторинга и прогноза. Магматизм и его поверхностные проявления в форме активного вулканизма имеют несколько характерных особенностей, вследствие чего их поведение можно предвидеть [7]. Однако, эти попытки не всегда успешны по ряду причин [1, 2, 17]. Продвижение вперед в этой области невозможно без учета большого опыта, накопленного на Камчатке за 65-летний период инструментальных наблюдений. Большинство достижений в этой сфере во второй половине XX столетия было связано с именем к.ф.-м.н. Павла Ивановича Токарева, заведующего лабораторией Прогноза и механизма извержений (ПиМИ) Института вулканологии ДВО РАН, председателя рабочей группы по изучению землетрясений и деформаций земной поверхности вулканических районов Международной ассоциации вулканологии и химии недр Земли, а также с работами его учеников [10]. 21 июня 2023 г. исполнилось 100 лет со дня рождения этого замечательного ученого, создателя научной школы по сейсмологическому прогнозу вулканических извержений и изучению их механизмов. За выдающиеся научные результаты Павел Иванович неоднократно награждался правительственными наградами. Его школа продолжает развиваться. Детальный критический анализ работ школы опубликован в [3]. Здесь дается краткое перечисление достижений школы П.И. Токарева, перспективных, на наш взгляд, направлений исследований, а также представлений, не выдержавших проверку временем. Списки публикаций П.И. Токарева и его учеников даны в [10, 12-16].

**Формирование научных направлений и их развитие**

После окончания Московского университета в 1953 г. П.И. Токарев поступил на работу в Лабораторию вулканологии АН СССР в Москве, где окончил аспирантуру. В 1957 г. он был направлен на Камчатскую вулканологическую станцию в пос. Ключи как сейсмолог, где к тому времени были активно изучены Ключевская группа, состоящая из 13 вулканов, и один из самых мощных магматических центров планеты – вулкан Шивелуч, составлен каталог действующих вулканов Камчатки и Курильских островов [11]. П.И. Токарев создал сейсмическую сеть и систему оперативного слежения за состоянием действующих вулканов. Определелись его направления исследований, была защищена кандидатская диссертация [10]. После образования в 1962 г. Института вулканологии СО АН СССР П.И. Токарев возглавил лабораторию сети геофизических стационаров, а затем лабораторию ПиМИ (рис. 1). Работа велась в кооперации с группой обработки Камчатской вулканостанции (рук. к.ф.-м.н.

В.И. Горельчик). В 1971-1972 гг. силами лаборатории была организована и в течение многих лет обслуживалась удаленная Карымская комплексная геофизическая обсерватория, расположенная на расстоянии 3.5 км от одного из самых активных вулканов Камчатки – Карымского, которая проработала до 1986 года (рис. 2). В дальнейшем эти работы продолжились в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН О.П. Руленко, В.В. Ивановым и в Камчатском филиале Единой геофизической службы РАН под руководством д.ф.-м.н. П.П. Фирстова [13].



Рис. 1. Заведующий лабораторией ПиМИ Института вулканологии ДВО РАН П.И. Токарев (21.06.1923 – 08.02.1993) и лаборатория ПиМИ в начале 1980-х гг. (сфотографирована часть сотрудников). Слева направо: нижний ряд Н.И. Реутова, П.И. Токарев, Ю.В. Карпущина; верхний ряд В.В. Иванов, Е.И. Хименко, В.А. Широков, В.В. Степанов, В.Ф. Радчук и А.М. Пашенко. Фото В.А. Подтабачного.

Рис. 2. Вулкан Карымский и Карымская комплексная геофизическая обсерватория ( $\Delta = 3.5$  км). Построена в 1970 г. сотрудниками лаб. ПиМИ под руководством П.И. Токарева и П.П. Фирстова. Фото Н.П. Смелова.

### Направления исследований

П.И. Токаревым и лабораторией ПиМИ в Институте вулканологии ДВО РАН проводились плановые масштабные исследования по следующим направлениям: 1) тектоника и вулканизм (В.А. Широков); 2) вулкано-географическое районирование (П.И. Токарев совместно с Е.К. Мархининым, А.Н. Сириным и К.М. Тимербаевой); 3) космофизические факторы, долго- и среднесрочный прогноз (В.А. Широков); 4) краткосрочный прогноз по сейсмологическим данным и по комплексу параметров (П.П. Фирстов, В.А. Широков, А.В. Сторчеус, В.В. Иванов); 5) количественная характеристика и повторяемость извержений (В.В. Иванов); 6) механизм вулканических извержений, акустические исследования и Карымская обсерватория (П.П. Фирстов и А.В. Сторчеус); 7) электромагнитные исследования (О.П. Руленко и В.М. Трубников); 8) эруптивные вулканические облака (О.П. Руленко и В.В. Иванов); 9) методики мониторинга действующих вулканов (В.В. Иванов) (рис. 3).

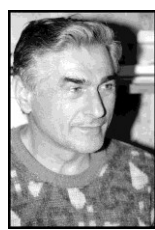


Рис. 3. Научные сотрудники лаборатории ПиМИ, ученики П.И. Токарева. Слева направо: к.ф.-м.н., в.н.с. Владимир Алексеевич Широков (3.06.1940-2.02.2021); д.ф.-м.н., зав. лабораторией Павел Павлович Фирстов (6.04.1941-20.07.2021); н.с. Александр Васильевич Сторчеус (27.08.1950-5.11.2010); ведущий инженер Валерий Митрофанович Трубников (15.05.1946-07.2005); к.ф.-м.н., с.н.с. Олег Петрович Руленко; к.г.-м.н., с.н.с. Виктор Васильевич Иванов.

### Краткое обсуждение результатов работы научной школы П.И. Токарева

В 1959 г. П.И. Токаревым в его фундаментальной работе впервые исследована сейсмофокальная зона Камчатки, связь вулканизма и тектоники района [5].

Среди методик долго- и среднесрочного прогноза можно отметить, во-первых, важную для практики методика выделения групп верхнемантийных землетрясений под цепью вулканов (глубины 70-300 км) и их связи с извержениями [12]. П.И. Токарев и В.А. Широков считали, что появление землетрясений на таких глубинах свидетельствует об увеличении литостатического давления и, соответственно, избыточного давления в магматических очагах. Такие землетрясения они интерпретировали как «активизацию» среды в области зарождения магм, своего рода «возмущение», которое, по их мнению, через некоторое время распространяется к поверхности земли и приводит к извержениям. Однако предложенная интерпретация не выдержала проверки временем. В работе [4] обосновывается, что наоборот, появление верхнемантийных и коровых землетрясений свидетельствует о снижении литостатического давления в зонах субдукции, о разгрузке среды, что благоприятствует подъему магмы по субвертикальным магматическим каналам. Эта концепция хорошо согласуется с недавними извержениями вулканов Безымянный и Шивелуч, произошедшими при значительном усилении сейсмичности в Камчатском заливе. Заслуживает внимания методика выделения активных вулканических фаз в пределах солнечного цикла 18.6 года В.А. Широкова, которая показала свою высокую эффективность. Представляется перспективным дальнейшее развитие его работ по влиянию общепланетарных факторов на вулканы, например, влияния скорости вращения Земли и ведущей роли целочисленных резонансов в Солнечной системе [12].

П.И. Токаревым была предложена классификация вулканических землетрясений Камчатки, номограммы для определения их энергии. Впервые для анализа сейсмического режима вулкана им были использованы кумулятивные графики условных сейсмических деформаций Беньоффа, даны формулы для их аппроксимации и оценки времени начала извержения [6]. Впрочем, практика применения предложенных им сейсмологических методик краткосрочного прогноза показала, что они не являются универсальными. В ряде случаев эти графики перед извержениями андезитовых вулканов развиваются не по гиперболическому, а по экспоненциальному или линейному законам, которые не имеют вертикальных асимптот. Прогнозирование времени начала таких извержений сейсмологическим методом затруднительно. Показано, что различие видов сейсмологических предвестников андезитовых вулканов определяется состоянием центрального питающего канала вулкана накануне извержения (открытая или закрытая система). При этом важны как характер завершения предыдущего извержения (эксплозивное или эффузивное), так и процессы, происходящие в его питающем канале между извержениями [16]. Хорошие перспективы для краткосрочного прогноза имеет методика комплексирования факторов В.А. Широкова [12]. Главной проблемой остается прогнозирование пароксизмальных фаз извержений андезитовых и дацитовых вулканов в результате внезапного обрушения их огромных лавовых куполов или подхода к поверхности земли огромных «пузырей» газонасыщенной магмы в условиях непрерывного движения магмы (открытая система) и отсутствия предвестников [2].

Особого внимания заслуживают работы П.И. Токарева, П.П. Фирстова и А.В. Сторчеуса по механизмам вулканического дрожания, землетрясений и вулканических взрывов на основании акустических и сейсмических данных на вулканах Карымский, Ключевской и Толбачик [10, 13-14]. Выдающимся результатом следует считать реконструкцию динамики катастрофического извержения вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. П.П. Фирстова [13], уточнение по сейсмологическим данным конфигурации периферического магматического очага вулкана Карымский и обнаружение связи вулканических землетрясений с тектонической обстановкой (В.А. Широков, В.В. Иванов, В.В. Степанов). Классическим является экспериментальное исследование электризации вулканических облаков, предпринятое О.П. Руленко, а также теория образования капельных парогазовых облаков (В.В. Иванов).

Разработанные методики имели практическое применение. На их основе были эффективно предсказаны следующие извержения: вулкана Шивелуч в 1964 г. (предвидение), времени и места Большого Толбачинского извержения в 1975 г., побочного извержения вулкана Ключевской в 1983 г. (П.И. Токарев), вулкана Шивелуч в 1993 г. (В.А. Широков с коллегами), вулкана Карымский в 1996 г. (А.В. Сторчеус), и извержения вулкана Шивелуч в 2001 г. (В.В. Иванов).

Исследования по прогнозу и механизму вулканических извержений на Камчатке в рамках научной школы П.И. Токарева существенно продвинули наше понимание природы вулканической деятельности, ее опасности и методик снижения вулканического риска. В рамках этой школы защищены четыре кандидатских и одна докторская диссертация, опубликованы три монографии и более 200 научных статей [6-9]. Под руководством д.ф.-м.н. П.П. Фирстова недавно были подготовлены и защищены еще три кандидатских диссертации (Е.О. Макаров, А.А. Шакирова и Р.Р. Акбашев). Научная школа П.И. Токарева продолжает развиваться. Полученные в ее рамках результаты будут способствовать появлению новых направлений в науке и практике изучения активного вулканизма, мониторинга и прогноза вулканических извержений.

Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю П.И. Токареву, сотрудникам лаборатории ПиМИ за совместную работу, Г.А. Карпову за редактирование, В.А. Подтабачному и Н.П. Смелову за фотографии и М.В. Кузнецовой за организацию выставки к 100-летию даты со дня рождения П.И. Токарева.

### Список литературы

1. *Иванов В.В.* Средне- и краткосрочные прогнозы извержений вулканов на Камчатке (1956-2012 гг.) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 2. Вып. 22. С. 98-118.
2. *Иванов В.В.* Прогноз извержений вулканов на Камчатке (основные итоги 1955-2012). Ч. II. «Пропуски цели», «ложные тревоги» и их возможные причины // История и педагогика естествознания. 2015. № 2. С. 14-19.
3. *Иванов В.В.* Исследования по прогнозу вулканических извержений на Камчатке и изучении их механизмов за 1959-2022 гг. (аналитический обзор) // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2023. № 5-6. С. 78-90.
4. *Ребецкий Ю.Л., Стефанов Ю.П.* О механизме взаимодействия сильных землетрясений и вулканизма в зонах субдукции // Вестник КРАУНЦ. Серия Науки о Земле. 2022. № 4. Вып. 56. С. 41-58.
5. *Токарев П.И.* О связи вулканической и сейсмической активности в Курило-Камчатской зоне // Труды Лаборатории вулканологии АН СССР. 1959. Вып. 17. С. 156-182.
6. *Токарев П.И.* Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука, 1966. 118с.
7. *Токарев П.И.* Предсказание места и времени начала большого Толбачинского извержения в июле 1975 г. // ДАН СССР. 1976. Т. 229. № 2. С. 439-442.
8. *Токарев П.И.* Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164с.
9. *Фирстов П.П.* Вулканические акустические сигналы диапазона 1.0-10 Гц и их связь с взрывным процессом. Петропавловск-Камчатский: Издательство КГПУ, 2003. 90 с.
10. <http://www.kscnet.ru/ivs/memory/TokarevPI/> (электронный ресурс, П.И. Токарев).
11. [http://www.kscnet.ru/ivs/lkamv/kamchat\\_volc\\_station/index.html](http://www.kscnet.ru/ivs/lkamv/kamchat_volc_station/index.html) (электронный ресурс).
12. <http://www.kscnet.ru/ivs/memory/ShirokovVA/> (электронный ресурс, В.А. Широков).
13. <http://www.kscnet.ru/ivs/memory/FirstovPP/> (электронный ресурс, П.П. Фирстов).
14. [https://scholar.google.com/scholar?start=0&q=author:%22a+v+storcheus%22+OR+author:%22a+v+storcheus%22&hl=ru&as\\_sdt=0,5](https://scholar.google.com/scholar?start=0&q=author:%22a+v+storcheus%22+OR+author:%22a+v+storcheus%22&hl=ru&as_sdt=0,5) (электронный ресурс, А.В. Сторчеус).
15. [https://www.mathnet.ru/php/person.phtml?option\\_lang=rus&personid=123411](https://www.mathnet.ru/php/person.phtml?option_lang=rus&personid=123411) (электронный ресурс, О.П. Руленко).
16. <http://www.kscnet.ru/ivs/bibl/sotrudn/ivanovvv.html> (электронный ресурс, В.В. Иванов).
17. *Sparks R.S.J.* Forecasting volcanic eruptions // Earth and Planetary Science Letters. 2003. V. 210. P. 1-15.