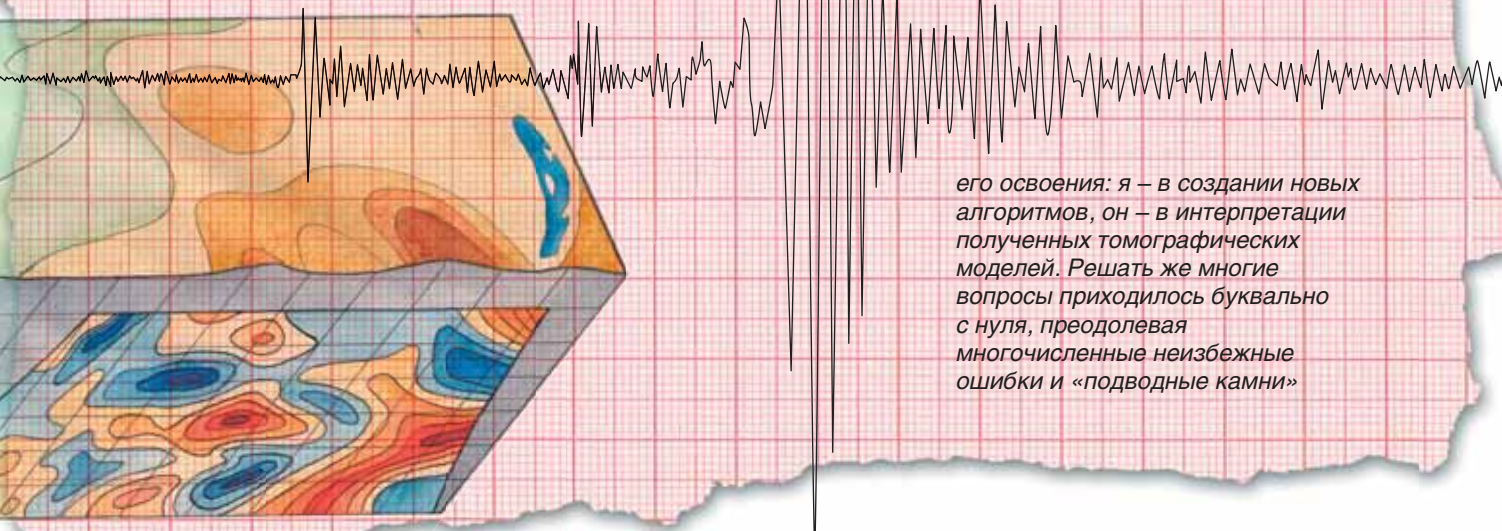


ВЗГЛЯД через призму сейсмотомографии



К сожалению, я не могу назвать академика Н. Л. Добрецова моим учителем в полном смысле этого слова, но, несомненно, он оказал существенное влияние на мое становление как ученого-геофизика. В начале 1990-х гг. метод сейсмической томографии находился еще на самой ранней стадии развития, не только у нас, но и во всем мире. Но Николай Леонтьевич с самого начала проявил к нему большой интерес. Можно сказать, мы вместе прошли все этапы

его освоения: я – в создании новых алгоритмов, он – в интерпретации полученных томографических моделей. Решать же многие вопросы приходилось буквально с нуля, преодолевая многочисленные неизбежные ошибки и «подводные камни»

Сейчас забавно вспоминать, как я, еще совсем «зеленый» научный сотрудник, приносил академику, директору института и председателю Сибирского отделения РАН первые томографические картинки. Раскрашены они были чуть ли не акварелью, поскольку цветных принтеров тогда еще не было. Николай Леонтьевич с энтузиазмом находил в этих красных и голубых пятнах плюмы и реликтовые зоны субдукции, которые, по его мнению, должны находиться именно там, где они были выделены с помощью томографии. На следующий день я с ужасом понимал, что при расчетах был перепутан знак, и все голубые аномалии нужно перекрасить в красный цвет, а красные – в голубой. К моему удивлению, Николай Леонтьевич восприни-

мал измененную картинку с неменьшим энтузиазмом, объясняя с ее помощью геодинамику региона ничуть не хуже, чем в предыдущем случае.

...Наши встречи обычно происходили в его кабинете часов в 8 утра. В приемной Николая Леонтьевича уже ждали заместители, бухгалтеры и прочие ответственные сотрудники аппарата института, директором которого он являлся. Однако, увлекаясь научными проблемами, он полностью забывал о политических и административных делах. Он в возбуждении ходил по кабинету, забирался на стул, чтобы показать на огромной карте структуры, расположенные в ее самой «далекой» северной части. Потом в какой-то момент, вспоминая вдруг о текущей рутине, смотрел на часы и стремительно убегал на встречу с каким-нибудь посланцем или президентом.

Вверху: пример томографической модели середины 1990-х гг. с изображением сейсмической структуры под югом Сибири. За неимением цветных принтеров рисунки раскрашивались вручную акварельными красками

Ключевые слова: Добрецов, метод сейсмической томографии, томографические модели, вулканы Камчатки, Курило-Камчатская дуга, Ключевская группа вулканов.
Key words: Dobretsov, seismic tomography, tomographic algorithms, Klyuchevskaya volcano group



Могу себе представить, какими словами меня склоняли люди в приемной, вынужденные уходить ни с чем.

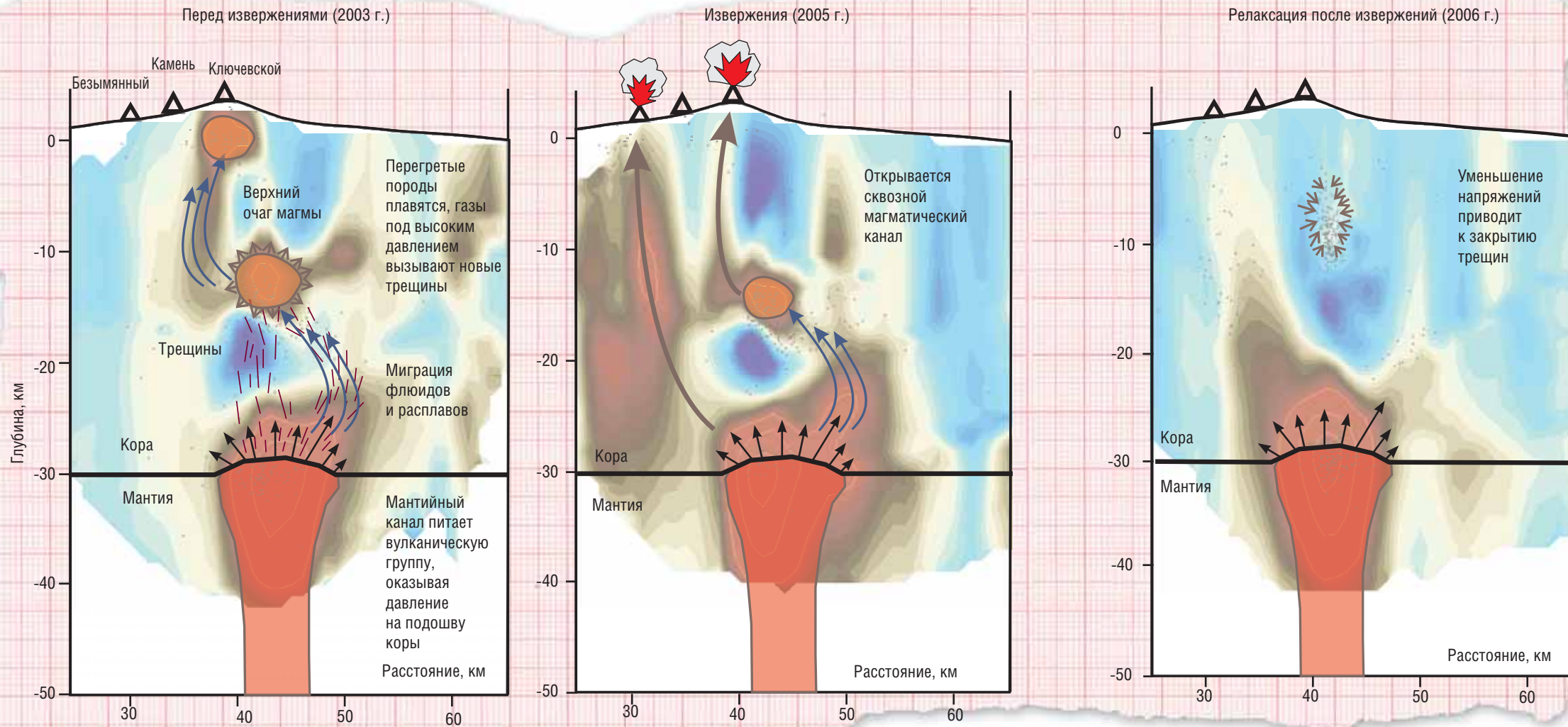
Не буду скрывать, что такое внимание большого человека было мне лестно и давало силы для дальнейшей работы. И особенно ценным оно было в те моменты, когда мои усилия подвергались ожесточенной критике (надо отдать должное, в большинстве случаев вполне справедливой) моих коллег-геофизиков из нашего института. Это сегодня сейсмическая томография является широко используемым надежным методом, который давно отошел от уровня «гадания на кофейной гуще». В Новосибирске нам удалось создать конкурентоспособную группу, которая старается быть на гребне самых актуальных исследований в области получения и интерпретации сейсмических изображений: алгоритмы, разработанные нами, сегодня используются исследователями по всему миру для изучения самых разных геологических объектов. Однако без постоянной поддержки Николая Леонтьевича, без его искреннего интереса к нашим робким первым упражнениям мы вряд ли достигли бы такого успеха на этом направлении.

По иронии судьбы, сейчас академик Н. Л. Добрецов работает в нашей лаборатории сейсмической томографии, т.е. формально я являюсь его руководителем. Думаю, излишне говорить, что он непростой сотрудник. Отбросив от себя большинство административных дел, он полностью погрузился в процесс научного творчества. И при этом не дает скучать всем, кто находится рядом с ним.

По инициативе академика Добрецова регулярно проводятся лабораторные семинары, которые традиционно пользуются большой популярностью среди сотрудников двух наших геологических институтов. На этих семинарах мы бурно обсуждаем самые разные вопросы наук о Земле. И хотя не все и не всегда соглашаются со смелыми предположениями Николая Леонтьевича, думаю, никто не будет оспаривать утверждение, что нестандартный и порой парадоксальный взгляд большого ученого позволяет

КУЛАКОВ Иван Юрьевич – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор более 70 научных работ

© И. Ю. Кулаков, 2016



На разных временных проекциях томографической модели земной коры под Ключевской группой вулканов (вулканы Безымянный, Камень и Ключевской) на п-ове Камчатка коричневым цветом отмечены высокие значения отношения скоростей пробега продольных и поперечных сейсмических волн (V_p/V_s), что является достаточно надежным индикатором наличия в породах флюидов и расплавов. Точки показывают положения гипоцентров землетрясений

ВУЛКАНИЧЕСКИЕ МЕТАМОРФОЗЫ

Сибирским исследователям одним из первых в мире удалось предоставить доказательства, что структура недр под вулканами может существенно меняться на различных этапах вулканической активности (Koulikov *et al.*, 2013). Для этого на основании данных длительных сейсмологических наблюдений была построена четырехмерная томографическая модель коры под вулканами Ключевской

группы Центральной части п-ова Камчатка и прослежены ее изменения на разных этапах извержения. В целом можно сказать, что основной питающий источник магмы под Ключевским вулканом, расположенный на глубине ниже 24 км, оставался неизменным в течение всего периода наблюдений. В то же время вышележащие структуры значительно менялись благодаря миграции флюидов и расплавов. В период, предшествующий крупным извержениям вулканов Ключевский и Безымянный, под ними находилось два тела с аномально высоким отношением скоростей продольных и поперечных сейсмических волн (V_p/V_s), которые были расположены друг над другом на глубинах 12 и 1 км. Эти аномалии отражают наличие промежуточных магматических камер, существование которых подтверждается петрологической информацией о разнообразии составов и режимов извержений вулканов Ключевской группы. При извержении конфигурация сейсмических аномалий изменилась, а среднее значение отношения V_p/V_s увеличилось. Это может свидетельствовать об активизации

миграции флюидов и расплавов во время извержения и насыщении ими пород под вулканами. В последующие три года после извержений средний уровень отношения V_p/V_s под вулканами уменьшился, а аномалии в верхней части коры исчезли. Это свидетельствует о наступлении фазы релаксации вулкана, когда количество флюидов в системе становится недостаточным для формирования магматических очагов. Эти результаты свидетельствуют, что магматические очаги являются очень динамичными системами. Вероятно, их вещество (пористое как губка) содержит перегретые породы, близкие к точке плавления. При проникновении флюидов из мантии температура их плавления понижается, что и приводит к частичному расплавлению пород и формированию магматических очагов. Однако если в результате вулканической активности флюиды в конце концов выходят на поверхность, расплавленная субстанция в магматических очагах может быстро исчезнуть

увидеть проблему и подойти к ее решению совершенно с другой стороны.

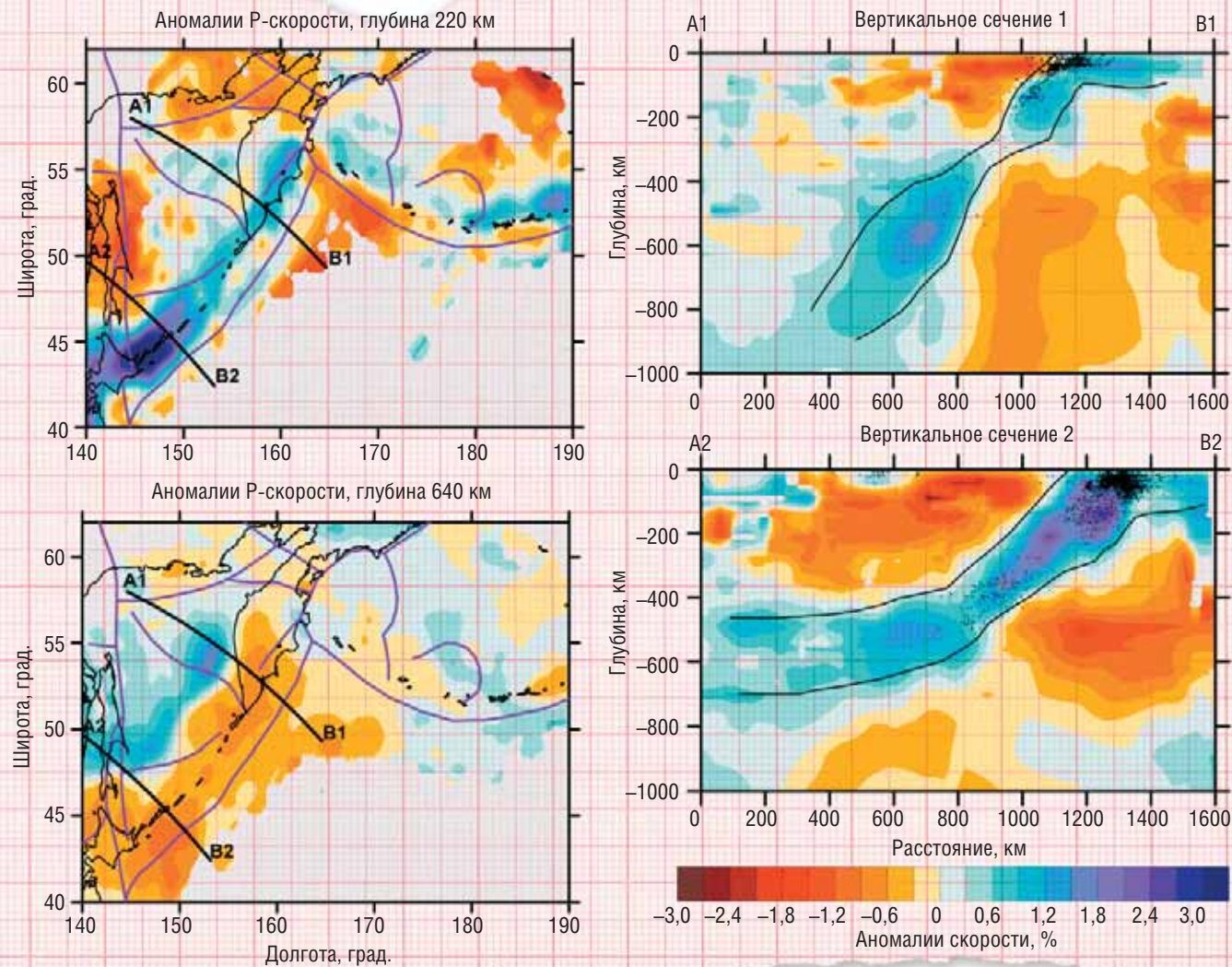
Общаясь с Николаем Леонтьевичем, я всегда восхищаюсь широтой эрудиции и тем огромным объемом знаний, который он держит в голове. Я не раз поражаюсь, как он умудряется быть в курсе геологической информации о любом районе, который мы начинаем обсуждать. Фиджи или Хоккайдо, Тайвань или Аляска – всегда у него готовы описания структур, основные геологические события и даже ученые, работавшие с этими регионами. При этом он может сделать паузу, сетуя на плохую память, а потом выдать труднопроизносимые названия и фамилии.

...В последние годы Н.Л. Добрецов принимает участие в полевых работах нашей лаборатории на Камчатке. В 2014 г. он смог обследовать и собрать геологические образцы в практически неприступных местах на вулкане Ичинская Сопка – второй по высоте точке Срединного хребта. Маленькому вертолету с Николаем Леонтьевичем на борту удалось приземлиться на вершине утеса, где ранее явно не ступала нога человека. На кадрах фотосъемки видно, как вертолет буквально ныряет со скалы в пропасть, так как из-за разреженности горного воздуха аппарат становится управляемым только при наборе определенной скорости.

Вместе с сейсмологической группой Николай Леонтьевич побывал и на камчатском вулкане Толбачик, менее чем за год до этого пережившем крупное извержение. Сразу же по прибытию на место после изматывающей многочасовой дороги он с горящими глазами приступил к изучению свежих, еще теплых лавовых потоков. Отмечу, что лавовые потоки – это далеко не место для расслабленной прогулки: более или менее плоские участки на них чередуются с хаотически разбросанными хрупкими, чрезвычайно подвижными и ужасающе острыми базальтовыми образованиями. По ощущениям – это все равно, что ходить по горам битого бутылочного стекла. Тем не менее до самой темноты Николай Леонтьевич буквально скакал по этим непроходимым местам вместе со студентом, который едва поспевал за ним. А уже следующим утром они еще затемно отправились в другой маршрут по исследованию потоков так называемого Большого трещинного Толбачинского извержения, случившегося в 1975 г.

Чутье и колоссальный геологический опыт Н.Л. Добрецова позволили собрать в этих коротких вылазках интересные образцы, анализ которых в Новосибирске дал материал для важных выводов по тектонике.

В 2015 г., накануне своего 80-летнего юбилея, академик Добрецов совершил очередные



Сотрудники лаборатории сейсмической томографии ИНГГ им. А. А. Трофимука СО РАН разработали алгоритм региональной томографии, который использует для изучения структуры мантии все доступные данные международных каталогов. С помощью этого алгоритма можно изучать даже те регионы, где нет сейсмических станций, но есть достаточное количество зарегистрированных землетрясений.

На модели сейсмических неоднородностей под Курило-Камчатской и Алеутской дугами, построенной с помощью этого алгоритма, мы видим четкое изображение погружающейся океанической плиты (слэба), которая проявляется как плоская наклонная аномалия с повышенными скоростями продольных (P) и поперечных (S) сейсмических волн. Заметно, что в различных сегментах дуги слэб имеет разную толщину и максимальную глубину погружения. В южных участках (сечение 2) слэб на глубине уплощается и становится практически горизонтальным на глубине 600–700 км, не проникая в нижнюю мантию. Под Северными

Результаты региональной томографической инверсии для Курило-Камчатской области и их интерпретация. Аномалии P-скорости показаны на двух горизонтальных (слева) и двух вертикальных (справа) сечениях. Точками показаны проекции гипоцентров землетрясений на профили

Курилами и Южной Камчаткой (сечение 1) слэб имеет форму капли, с более тонкой верхней частью и утолщением внизу. В этом случае слэб погружается на глубину 900 км, вплоть до нижней мантии.

Предполагается, что более пологое движение слэба и его утолщение в южной части дуги определяется «подталкиванием» литосферы со стороны океана. В северной части «каплеобразное» поведение литосферы и ее более крутое погружение обусловлено доминированием другого механизма – «гравитационного соскальзывания»



Н. Л. Добрецов собирает геологические образцы на вулкане Ичинская Сопка на вершине утеса, где еще не ступала нога человека. Чтобы взлететь отсюда, вертолету пришлось буквально «нырять» с утеса в пропасть. Камчатка, 2014 г.



геологические маршруты по вулканам Камчатки. В этот раз трудность заключалась в том, что вертолет, без которого достичь цели маршрута было невозможно, был задействован в крупномасштабной сейсмологической экспедиции для установления сейсмологических приборов на вулканах Ключевской группы. Неустойчивая погода не позволяла точно оценить продолжительность работ, и Николай Леонтьевич вынужден был томиться в долгом ожидании в Петропавловске-Камчатском. Получив отмашку, он всю ночь добирался на «частнике» до Козыревска и уже на рассвете, практически без отдыха, вылетел на вулканы Уксичан и Ичинский. А его водитель, с которым я ехал обратно в Петропавловск, поделился своим восхищением по поводу лекций по геологии, которыми Николай Леонтьевич развлекал его всю ночь.

Я думаю, что наука оставалась для Н. А. Добрецова главной страстью даже тогда, когда он руководил Сибирским отделением РАН и на занятия ей оставалось очень мало времени. Его эрудиция, способность посмотреть на задачу под неожиданным углом всегда очень вдохновляют и во многом определяют мои собственные успехи.

Литература:
Koulakov I., Gordeev E. I., Dobretsov N. L., Vernikovskiy V. A., Senyukov S., Jakovlev A., Jaxybulatov K., (2013). Rapid changes in magma storage beneath the Klyuchevskoy group of volcanoes inferred from time-dependent seismic tomography, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. V. 263. P. 75–91. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2012.10.014

Кулаков И. Ю., Добрецов Н. Л., Бушенкова Н. А., Яковлев А. В., (2011). Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии, *Геология и геофизика*, Т. 52. № 6, С. 830–851