

Л. А. Сим

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, sim@ifz.ru

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ПОЛЕВЫХ МЕТОДОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Посвящена памяти М. В. Гзовского

L. A. Sim

Schmidt' Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, sim@ifz.ru

HISTORY OF DEVELOPMENT OF FIELD METHODS FOR RECONSTRUCTION OF TECTONIC STRESSES

Dedicated to the memory of M. V. Gzovsky

«Михаил Владимирович Гзовский зажег путевые фонари в тектонофизике не только для своих современников, но и для тектонофизиков XXI в» — этой фразой я закончила свои воспоминания об Учителе в сборнике, посвященном 80-летию Михаила Владимировича [Сим, 2000]. С тех пор прошло 20 лет, но я уверенно повторяю эту фразу в сборнике, посвященном 100-летию Михаила Владимировича. Я являюсь представительницей одной из пяти студентов кафедры динамической геологии геологического факультета МГУ, которая прослушала единственный факультативный курс тектонофизики, прочитанный Михаилом Владимировичем в МГУ в 1965 г. Известно, что Михаил Владимирович, будучи выпускником МГРИ, читал свои курсы именно во МГРИ. Более подробно о курсе Михаила Владимировича в МГУ было написано мною в сборнике [Гзовский..., 2000]. Все пять бывших студентов М.В. Гзовского достигли больших успехов в тектонофизике: О.И. Гуценко предложил свой метод реконструкции тектонических напряжений [Gushchenko, 1973; Гуценко, 1979], В.В. Степанов предложил метод расчета тектонических деформаций [Степанов, 1979], Н.Ю. Васильев активно применяет методику О.И. Гуценко и развил ее для прогноза месторождений рудных и промышленных полезных ископаемых [Васильев и др., 2017]. В.А. Кондратов — пятый студент нашей группы слишком рано (1979 г.) ушел из жизни, но успел на месторождениях урановых руд в Казахстане и в Забайкалье употребить те знания, которые он получил на курсе М.В. Гзовского. Создание кинематического метода позволило по-новому подойти к проблеме, поставленной М.В. Гзовским. Эти новые подходы требовали не только знаний структурной геологии и наличия опыта полевых работ, но и хорошего понимания механических основ разрушения горных пород. Исследования О.И. Гуценко дали импульс механикам на дальнейшее развитие методических основ реконструкции природных напряжений. Вслед за методом О.И. Гуценко появились новые методы, созданные С.Л. Юнгой и Ю.Л. Ребецким. Юрий Леонидович — заведующий лабораторией им. М.В. Гзовского, достиг значительных успехов в изучении тектонических напряжений как по сейсмологическим, так и по геологическим данным. Он предложил и обосновал возможность расчета полного тензора напряжений на основе обобщения результатов экспериментальных работ по разрушению горных пород и привлечения дополнительных сейсмологических данных о динамических параметрах очага землетрясений [Ребецкий, 2005, 2007]. Программа StressGeol, составленная Юрием Леонидовичем для реконструкции тектонических напряжений по замерам векторов перемещений на зеркалах скольжения, в последние годы успешно используется сотрудниками лаборатории А.В. Марининым и И.В. Бондарем на Большом Кавказе, Тянь-Шане, Хибинах и др. регионах [Маринин, 2013; Маринин и др., 2016; Бондарь и др., 2019].

Эта статья включает в себя элементы эссе, которые неуместны в научных журналах. В специальном сборнике, посвященном 100-летию крупнейшего тектонофизика, моего учителя М.В. Гзовского, пожалуй, история возникновения структурно-геоморфологического метода (СГ) реконструкции напряжений платформ, отвечающих типу напряженного состояния в виде горизонтального сдвига [Сим, 1991] и других методов будет уместна. Метод предложен мною в 1987 г. на основе обобщений о парагенезах вторичных нарушений в зонах горизонтальных сдвигов, сделанных М.В. Гзовским [Гзовский, 1975, с. 148]. Идея использовать эти парагенезы возникла в экстремальной ситуации. В конце 80-х годов Атомэнергопроект производил изыскания и разработку технико-экономического обоснования строительства одновременно двух атомных электростанций: Печорской

и Карельской. В число задач, поставленных перед подрядчиком (объединение «Аэрогеология», партия № 14) стояли задачи, кроме геологической съемки масштаба 1:200 000 с детальным изучением участков, выбранных под строительство АЭС, выделения активных современных разломов и т.д., исследования параметров современного напряженного состояния районов проектируемых АЭС в масштабе 1:200 000 на участках геологической съемки того же масштаба, а также масштаба 1:1 000 000 — на территории между Карельской и Печорской АЭС (!?!). С партией № 14 я работала на протяжении более 10 лет, и в том числе благодаря работе с этой организацией, мною была составлена схема тектонических напряжений зоны сочленения Мезенской синеклизы и Тимана [Сим, 1980], в пределах которой в бассейне р. Вашка была выбрана площадка проектирования Печорской АЭС. Подрядчики — аэрогеологи обратились ко мне с предложением заключить договор о проведении тектонофизических исследований. По Печорской АЭС материалы были готовы, по Карельской нам давалось 2 полевых сезона для проведения тектонофизической съемки. Встала очевидная проблема характеристики неотектонических (и современных) напряжений территории континентальной части СССР в пределах Русской плиты и Балтийского щита до широты г. Ленинграда (60° с.ш.) в масштабе 1:1 000 000 — это была невыполнимая задача. Сейсмических данных о механизмах очагов землетрясений на эту территорию не было, кроме единичных механизмов в акватории Баренцева моря и Осмуссаарского землетрясения в Балтийском море. Кроме того, на Кольском п-ове в рудниках Хибинского и Ловозерского массивов были немногочисленные данные инструментальных измерений современных тектонических напряжений, а также небольшие участки с восстановленными кинематическим методом тектоническими напряжениями на побережьях Онежского озера и Кандалакшского залива [Бабак и др., 1981], — и всё! Как на этой основе можно было характеризовать тектонические напряжения такой огромной площади! На оба участка, выбранные под проектирование АЭС, были восстановлены параметры «общего поля» тектонических напряжений [Сим, 1982]. Обоснование этого метода будет рассмотрено ниже после обсуждения проблем с Карельской АЭС.

Я решила, что единственное, что объединяет поле напряжений этой территории по моим данным, — это то, что на Мезенской синеклизе (вместе со Средним Тиманом) оно отвечает геодинамическому типу напряженного состояния в виде горизонтального сдвига с субмеридиональной ориентировкой оси сжатия и субширотной — растяжения. В Карелии на территории тектонофизической съемки масштаба 1:200 000 тоже получилось «общее поле» напряжений (ОПН), отвечающее горизонтальному сдвигу, но ориентации осей максимального девиаторного сжатия и растяжения (далее сжатия и растяжения) были другими: в Карелии ЗСЗ ориентация оси сжатия, субмеридиональная — растяжения. Эта единственная общность характеристик тектонических напряжений двух площадей, удаленных на расстояние около 1000 км, а именно: тип напряженного состояния горизонтального сдвига, заставил пересмотреть работы М.В. Гзовского, особенно в той части, где обсуждалась теория деформации простого сдвигания [Гзовский, 1975, с. 138–149]. Прежде всего, на вооружение была взята фраза о том, что «платформенные разрывы отличаются большой протяженностью (многие сотни километров), хрупкостью, очень простым строением плоского сосредоточенного шва, очень слабой сейсмичностью, особой минерализацией. Такие разрывы образуют сетки нарушений, выявленных особенно полно при аэрофотосъемках. Они нередко тянутся независимо от простиранья слоев и складок в складчатом основании платформ».

А взаимные ориентировки триады трещин — двух сколовых и в остром углу между ними — отрывов [Гзовский, 1975, с. 148] были положены в основу метода (рис.1, а, б). Достаточно большое значение имела фраза об особенно полном обнаружении сеток нарушений, выявленных на фотоснимках, которые активно применяются при использовании СГ метода. Множество данных о крутом падении крупных разломов на платформах также способствовало убеждению о сдвиговом поле напряжений на платформах.

Со временем были сформулированы следующие пункты обоснования СГ метода: 1 — крутопадающие разломы на платформах требуют сдвигового поля напряжений; 2 — в верхних частях земной коры (осадочного чехла) малы гравитационные силы, соответственно, из-за отсутствия (или малого) литостатического давления ось сжатия может быть субгоризонтальна; 3 — относительно применения СГ метода в пределах чехла платформ обоснованием СГ метода служат данные моделирования сдвигов на платформенных плитах Ю.Л. Ребецкого (математическое моделирование) [Ребецкий, 1987] и А.В. Михайловой (физическое моделирование) [Михайлова, 2002]. Моделирование сдвигов на платформах было проведено сотрудниками лаборатории тектонофизики им. М.В. Гзовского ИФЗ РАН Ю.Л. Ребецким и А.В. Михайловой, что важно отметить в связи со 100-летним юбилеем М.В. Гзовского.

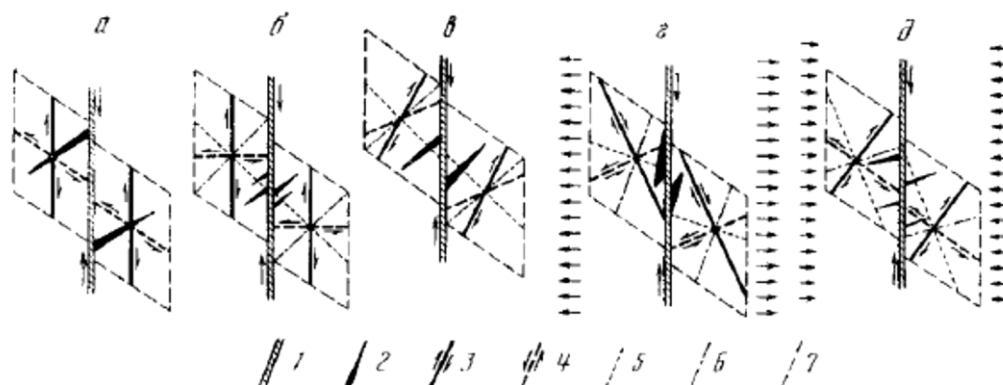


Рис. 1, а. Схема расположения осей напряжений и трещин в момент их возникновения при деформации сдвига: *а* — широко распространенная неправильная схема; *б-д* — рекомендуемая схема: *б* — при угле скалывания 45° , *в* — при угле скалывания меньше 45° , *г* — при угле скалывания 45° и дополнительном растяжении, *д* — при угле скалывания 45° и дополнительном сжатии. 1 — шов главного разрыва; 2 — трещины отрыва; 3, 4 — сопряженные трещины скалывания; 5-6 — оси напряжений σ_1 и σ_3 ; 7 — условные границы рассматриваемого участка [по: Гзовский, 1975, с. 148]

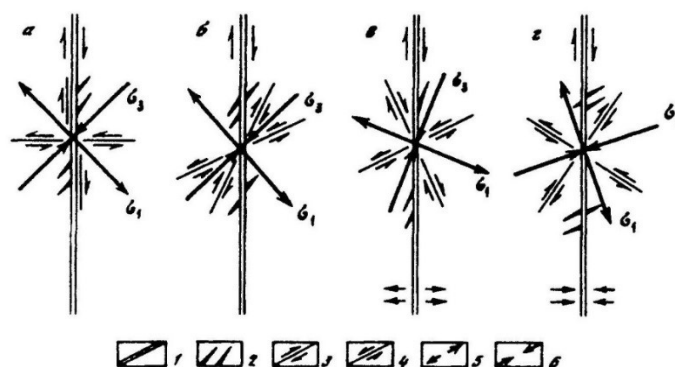


Рис.1, б. Палетка Гзовского (рис. 1, а с изменениями). Варианты напряженного состояния при углах скалывания близких к 45° (*а*), меньше 45° (*б*), обстановка дополнительного растяжения (*в*) и сжатия (*г*): 1 — разлом; 2 — трещины отрыва; 3, 4 — сколы с правой (3) и левой (4) сдвиговой кинематикой; 5, 6 — ориентация дополнительного растяжения (5) и сжатия (6) в горизонтальной плоскости

Данные моделирования показали, что если по разломам фундамента независимо от их предшествующей кинематики, происходят перемещения вдоль простирания, то в основании чехла над разломами формируются максимумы касательных напряжений; в средней части чехла они существенно меньше, а на дневной поверхности возникает второй максимум касательных напряжений, приводящий к формированию трещин оперения, соответствующих оперяющим трещинам (разрывам) сдвигу в фундаменте (рис. 2).

Таким образом, даже при отсутствии в средней части осадочного чехла магистрального разлома, в верхней части осадочного чехла фиксируются оперяющие разрывы (в нашем случае мегатрещины — мелкие прямолинейные элементы рельефа), образованные за счет горизонтальных сдвиговых подвижек по разлому фундамента. Именно по этим мегатрещинам на дневной поверхности дешифрируются зоны повышенной трещиноватости в виде линеаментов.

СГ метод дает возможность определить ориентировки в горизонтальной плоскости осей сжатия и растяжения, направление сдвигового перемещения по разлому (правый или левый сдвиг), дополнительные факторы геодинамической обстановки формирования разлома (дополнительное сжатие или растяжение, ориентированное нормально к плоскости разлома). Для использования этого метода были собраны данные о крупных разломах значительной части севера Восточно-Европейской платформы до широты г. Ленинграда, как это было сформулировано в техзадании Атомэнергопроекта. Вдоль разломов были отдешифрированы мелкие прямолинейные элементы рельефа, трактуемые нами как мегатрещины — возможные оперяющие трещины (опережающие — термин К.Ж. Семинского), которые при сопоставлении с палеткой Гзовского позволили составить первую схему тектонических

напряжений севера Восточно-Европейской платформы [Сим, 1991]. Позже этой же методикой были восстановлены тектонические напряжения всей Русской плиты, Западно-Европейской, Тимано-Печорской и Скифской молодых плит и произведено обобщение всех полевых данных о тектонических напряжениях северной Евразии, в которое также вошли данные проведенной А.В. Марининым реконструкции тектонических напряжений на Северо-Западном Кавказе и Тянь-Шане с использованием метода катакластического анализа разрывных смещений Ю.Л. Ребецкого [Сим и др., 2018].

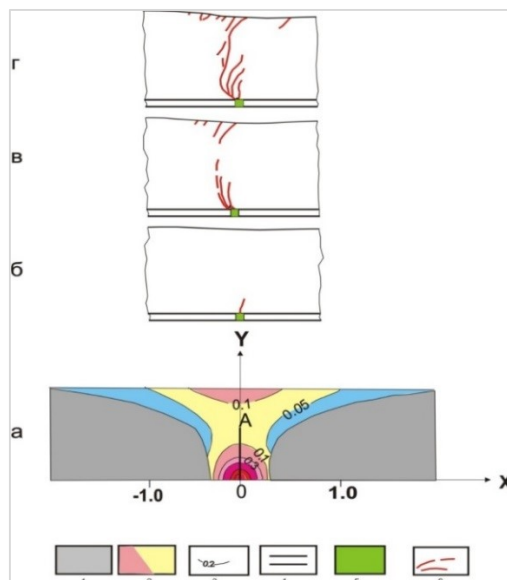


Рис. 2. Разрушение слоя над сдвигом в его основании:

а — расчетные эквивалентные напряжения, ответственные за разрушение [Ребецкий, 1987]; *б-г* — последовательные стадии развития разрывов [Михайлова, 2002]: *б* — зарождение разрыва в слое над областью горизонтального сдвига в основании; *в* — развитие разрывов двумя группами — снизу и сверху, *г* — объединение обеих групп разрывов. 1 — область двустороннего сжатия и отсутствия разрывов; 2 — область «скалывания»: максимальные девиаторные напряжения положительны, минимальные — отрицательны; 3 — изолинии эквивалентных напряжений; 4 — блоки фундамента в основании; 5 — зона дробления; 6 — разрывы (в разрезе)

В прошлом году молодые коллеги лаборатории тектонофизики Н.А. Гордеев и А.Б. Молчанов автоматизировали СГ метод [Гордеев, Молчанов, 2019], что существенно ускорит реконструкцию тектонических напряжений указанным методом.

Здесь необходимо отметить, что я была во время работы по проекту выбора площадки под строительство Карельской АЭС Атомэнергопроектом активной противницей строительства АЭС в Карелии, потому что Карелия буквально «вчера» освободилась от ледника и представляет собой соединенные друг с другом озера, реки и речки — единая водная система, которая может быть мгновенно отравлена как зона отдыха для россиян. Ведь проектирование этой АЭС производилось практически сразу после Чернобыльской трагедии 1986-го г., известной своими последствиями. Из-за этой точки зрения представители «Атомэнергопроект» готовы были разорвать со мной контракт, но я работала как субподрядчик по договору с подрядчиком «Атомэнергопроекта» партией № 14 объединения «Аэрогеология», сотрудники которой поддерживали мою точку зрения, но не столь активно, как я.

Мои «Заказчики» решительно отказались прерывать контракт со мною, так что работы были продолжены. Тогда, в конце 80-х — начале 90-х годов было мощное движение жителей Карелии против строительства АЭС. 10 декабря 1989 г. протестные настроения вылились в антиатомный марш. Был организован двухчасовой митинг, лозунги которого в итоге услышали власти. В мае 1990 г. Верховный совет Карелии выступил против атомной электростанции и запретил дальнейшие инженерные работы. После этого тема строительства АЭС поднималась еще раз 15 лет назад. Однако тогдашнее руководство Карелии во главе с Сергеем Катанандовым также сумело доказать федеральному руководству, что атомная станция принесет республике больше вреда, чем пользы. Кстати, пользуясь заявленным выше жанром «эссе» хочу заметить, что и сегодня тема Карельской АЭС остается актуальной. Активным противником строительства АЭС в Карелии является ст. научный сотрудник

Карельского научного центра Д. Рыбаков, считающий «что это ущербно для нашей республики как в экологическом, так и экономическом плане и что для Карелии важнее развивать альтернативные, возобновляемые источники энергии. Но это сегодня практически не делается (сайт «Карельская АЭС» в Интернете).

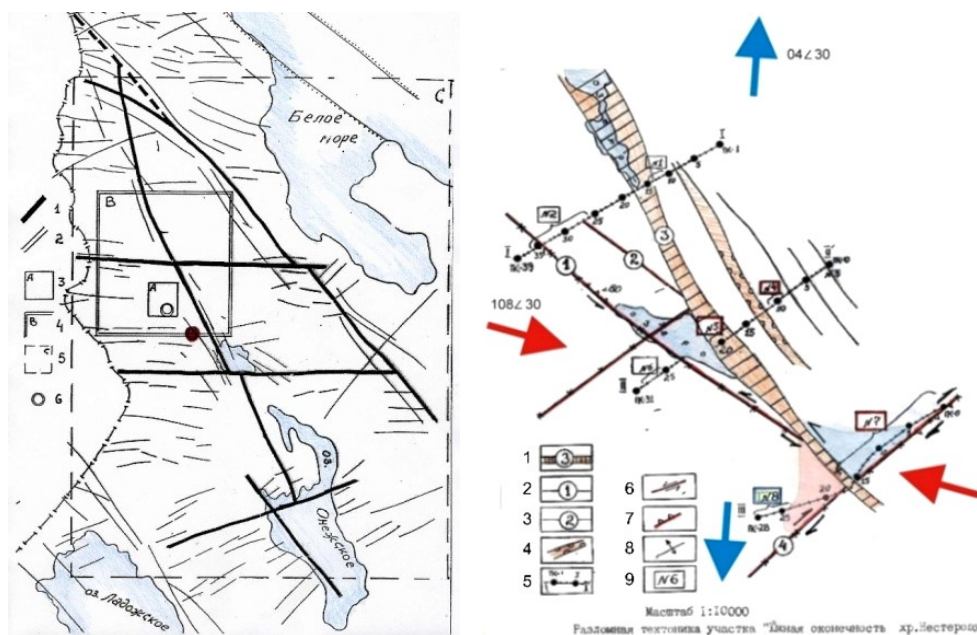


Рис. 3. Геохимическое профилирование в районе выбора площадки под строительство Карельской АЭС.

Слева: а — Район проектируемой Карельской АЭС. 1–2 — разломы: а — I, 2 — II и более мелких рангов; 3–6 — площади геологической съемки: 3 — детальной, 4 — масштаба 1:200 000, 5 — масштаба 1:1 000 000; 6 — геохимического профилирования. Справа: Разломная тектоника участка «Южная оконечность хребта Нестерова». Цифры в кружках — разломы; 1 — главный, одна из ветвей Онего-Сегозерского разлома; 2 — разломы 2-го ранга (1, 2 и 4), 3 — более мелкие разломы; 4 — ров, образованный между двумя крупными поверхностями рассланцевания — разломами; 5 — геохимические профили и точки отбора проб; 6 — сдвиги, 7 — взбросы; 8 — взрезы; 9 — номера геохимических аномалий. Голубой цвет — сектор растяжения, красный — сектор сжатия; образованы за счет разнонаправленных сдвиговых подвижек по разломам № 4 и № 7; цветные крупные стрелки — проекции на горизонтальную плоскость оси сжатия (красные) и растяжения (синие) общего поля напряжений (ОПН), восстановленного для площади геологической съемки масштаба 1:200 000

Тектонические напряжения на территории будущих Карельской и Печорской АЭС восстанавливались мною кинематическим методом О.И. Гущенко (графический вариант). Известно, что он основан на анализе векторов перемещения на зеркалах скольжения. При этом считается, что борозды скольжения преимущественно фиксируют следы последних перемещений, а Балтийский щит достаточно активен в неотектонический этап, т.е. мы считали, что как в Карелии, так и в Мезенской синеклизе кинематическим методом были восстановлены неотектонические напряжения. Начальство «Атомэнергопроекта», раздраженное моей «зеленой» позицией, потребовало от меня доказательства, что восстановленные мною тектонические напряжения являются неотектоническими и, более того, современными, что и нужно при проектировании АЭС. В связи с этим я пригласила сотрудников кафедры геохимии геологического факультета МГУ провести комплексное геохимическое профилирование через разломы.

На двух детальных участках геохимического опробования (рис. 3, слева) было проведено геохимическое опробование с шагом 25 м. Одновременно в каждой точке измерялось содержание радона в почве, углекислого газа и радиоактивность. Участки выбраны в поле развития моренных отложений. Разломы отдешифрованы по снимкам, направление сдвиговых перемещений прогнозировано по ориентировкам ОПН, реконструированного для всей площади съемки масштаба 1:200 000 (рис. 3, слева). Результаты опробования по одному из профилей показан на рис. 4. Над профилями вверху показаны аномалии № 7 и № 8, выделенные на рис. 3, справа. Очевидно, что аномалия 7, относящаяся к сектору локального растяжения (пересечение разломов с осью растяжения внутри) и показывающая резкие превышения содержания радона и углекислого газа при фоновых

значениях радиоактивности, обусловлена обстановкой дополнительного растяжения. В секторе сжатия (пересечение разломов с осью сжатия внутри) незначительная аномалия содержания радона вызвана повышенной радиоактивностью.

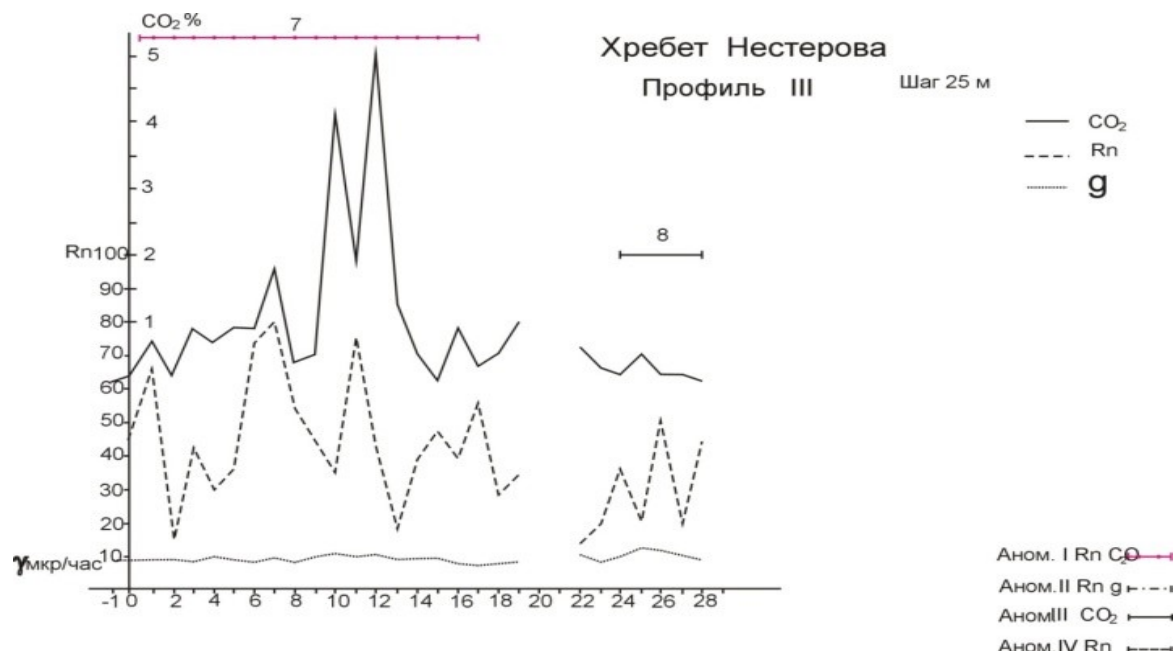


Рис. 4. Геохимический профиль вдоль разлома № 4. Над профилями сверху показаны аномалии № 7 и № 8, выделенные на рис. 3 справа

Так как объекты геохимического опробования были в четвертичных отложениях, нами было доказано, что восстановленные по бороздам скольжения в архей-протерозойских породах, характеризуют и современное поле напряжений — начальство Атомэнергопроекта было удовлетворено. Соответственно, изменения локальных стресс-состояний, восстановленных кинематическим методом в разных крыльях разломов, стало критерием активности разломов на современном этапе.

За основу ранжирования тектонических напряжений принят принцип изменчивости ориентировок локальных напряжений в окрестностях разлома при сдвиговой подвижке по нему [Сим, 1982]. Эта изменчивость получена при оптическом и математическом моделировании сдвигов [Осокина, 1987] и свидетельствует о том, что в окрестностях разлома ориентировки осей локальных напряжений изменяются в пределах 45°. Все оси локальных напряжений (отнесем их ко II рангу) в этом случае могут быть описаны конусами сжатия и растяжения с углом при вершине 90°, а оси конусов, соответственно, будут осями сжатия и растяжения I ранга или оси главных нормальных напряжений ОПН. На рис. 5 приведен пример анализа ОПН по данным определений локальных стресс-состояний в отдельных точках наблюдения в пределах Пелингичейского блока, который был выделен на Приполярном Урале по структурным признакам. Размер блока около 100 км².

Как уже упоминалось выше, сдвиговое ОПН района проектируемой Карельской АЭС характеризуется запад-северо-западной ориентацией оси сжатия, погружающейся по аз. 108 угол 30° и субмеридиональной — оси растяжения, погружающейся на север по аз. 4 угол 30° (рис. 3, справа).

Целью обзора истории развития полевых методов реконструкции тектонических напряжений было показать, какую важную роль играют работы Михаила Владимировича, в том числе в создании тектонофизических методов: четверо его учеников, прослушавших всего лишь один семестр факультативный курс тектонофизики, создали свои методы. Вольнослушатель Л.М. Расцветаев, также прослушавший этот курс, создал свой парагенетический метод, ряд тектонофизических методов изучения полей напряжений было создано исследователями, бывшими аспирантами Михаила Владимировича (П.Н. Николаев, В.Д. Парфенов) и сотрудниками лаборатории тектонофизики (Ю.Л. Ребецкий). Обоснование этих методов базировалось на данных математического и физического моделирования, активно проводившихся в созданной им лаборатории тектонофизики. Сегодня геологи лаборатории тектонофизики проводят активные тектонофизические исследования на Балтийском щите, Тянь-Шане, Большом Кавказе, Горном Алтае, Сахалине.

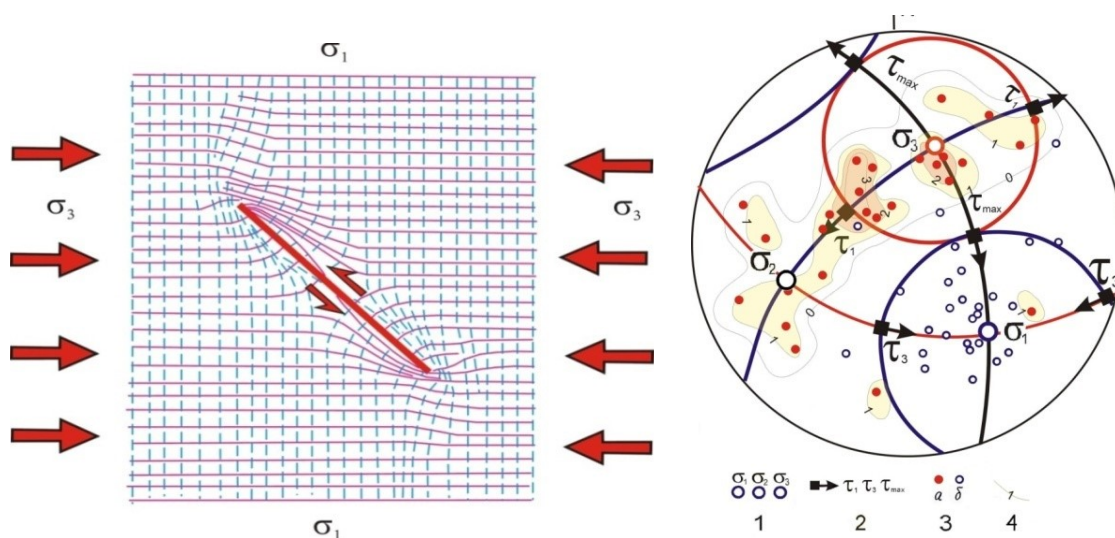


Рис. 5. Определение ОПН по данным определений стресс-состояний в локальных объемах. *Справа:* изменение ориентировок внешнего поля напряжений, вызванное перемещением по разрыву, по [Осокина, 1987]; *слева:* ОПН Пелинггичейского блока, Приполярный Урал:

1–2 — тектонические напряжения «общего поля»: оси главных нормальных напряжений: σ_1 — минимальных, σ_2 — промежуточных, σ_3 — максимальных сжимающих напряжений; 2 — полюса плоскостей действия касательных напряжений; 3 — оси локальных стресс-состояний: a — сжатия, b — растяжения, 4 — изолинии плотностей осей сжатия локального стресс-состояния

Сотрудники лаборатории тектонофизики гордятся тем, что лаборатория носит имя М.В. Гзовского. В создании методов изучения тектонических напряжений уже в последние годы принимают участие совсем молодые сотрудники лаборатории. Поэтому я повторяю фразу, которой я завершила свою статью 20 лет назад: «Михаил Владимирович Гзовский зажигает путевые фонари в тектонофизике не только для своих современников, но и для тектонофизиков XXI в».

Исследования проведены при финансовой поддержке госзадания ИФЗ РАН.

Литература

- Бабак В.И., Сим Л.А., Касаткин Ф.Г. Вариации тектонического поля напряжений восточной части Балтийского щита: автореф. докл. // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1981. Т. 56, вып. 1. С. 150.
- Бондарь И.В., Маринин А.В. Напряженно-деформированное состояние Хибинского массива по данным полевых тектонофизических исследований // Сергеевские чтения: Эколого-экономический баланс природопользования в горнопромышленных регионах. Пермь, 2019. Т. 21. С. 388–393.
- Васильев Н.Ю., Мострюков А.О., Петров В.А. Параметры тектонических деформаций в развитии геолого-структурных обстановок эндогенного рудообразования (результаты реконструкций по методике О.И. Гущенко) // Материалы Всерос. конф., посвящ. 120-летию со дня рожд. А. Г Бетехтина «Основные проблемы в учении об эндогенных рудных месторождениях: новые горизонты». 20–22 ноября 2017 г. М.: ИГЕМ РАН, 2017. С. 133–137.
- Гордеев Н.А., Молчанов А.Б. Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л.А. Сим // Геоинформатика. Моделирование геообъектов и геопроцессов. 2019. № 2. С. 25–33.
- Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 7–25.
- Маринин А.В. Тектонофизические исследования Семисамской антиклинали (Северо-Западный Кавказ) // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4, № 4. С. 461–484.
- Маринин А.В., Сим Л.А., Сычева Н.А., Сычев В.Н. Напряженно-деформированное состояние Киргизского хребта по данным изучения геологических стресс-индикаторов // Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: материалы докл. всерос. конф. М.: ИФЗ. 2016. Т. 1. С. 152–161.
- Михайлова А.В. Исследование механизмов формирования тектонических структур в слое над активными разломами фундамента в свете учения М.В. Гзовского // Тектонофизика сегодня. М.: ОИФЗ РАН, 2002. С. 212–224.

- Осокина Д.Н.* Об иерархических свойствах тектонического поля напряжений // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука, 1987. С. 135–151.
- Ребецкий Ю.Л.* Напряженное состояние слоя при продольном горизонтальном сдвиге блоков фундамента // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М., 1987. С. 4–56.
- Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения и прочность горных пород. М.: Академкнига, 2007. 406 с.
- Ребецкий Ю.Л.* Оценка относительных величин напряжений — второй этап реконструкции по данным разрывных смещений // Геофиз. журн. Киев, 2005. Т. 27, № 1. С. 39–54.
- Сим Л.А.* Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации) // Изв. вузов. геол. и разв. 1991. № 10. С. 3–22.
- Сим Л.А.* Мои воспоминания об Учителе // М.В. Гзовский и развитие тектонофизики. М.: Наука, 2000. С. 160–162.
- Сим Л.А.* Влияние глобального тектогенеза на новейшее напряженное состояние платформ Европы // М.В. Гзовский и развитие тектонофизики. М.: Наука, 2000. С. 326–350.
- Сим Л.А., Маринин А.В., Брянцева Г.В., Гордеев Н.А.* Результаты изучения тектонических напряжений в регионах Северной Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 3. С. 771–800. Doi:10.5800/GT-2018-9-3-0371.
- Степанов В.В.* Количественная оценка тектонических деформаций // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М. Наука, 1979. С. 67–71.
- Gushchenko, O.I.* Analysis of the orientations of the slip on the fault 926 plane and their tectonophysical interpretation during the reconstruction of 927 palaeostresses // Doklady Akademii Nauk SSSR. 1973. 210. P. 331–334.