

Гигантские обвалы на вулканах

А.Б.Белоусов, М.Г.Белоусова



Посвящается Борису Ивановичу Пийпу, неутомимому исследователю Камчатки, первому директору Института вулканологии РАН, нашему деду.

ВЕСНОЙ 1980 г. в Каскадных горах на северо-западе США активизировался вулкан Сент-Хеленс, находившийся в состоянии покоя с 1857 г. После семидневного роя вулканических землетрясений на его вершине стали происходить слабые выбросы пепла, и началось медленное вздутие его северного склона, указывавшее на внедрение магматического расплава в постройку вулкана — образование криптокупола. 18 мая 1980 г. спокойное развитие событий было внезапно прервано катастрофическим извержением — одним из сильнейших в XX в. Свидетельства многочисленных очевидцев, подкрепленные видео-, кино- и фотосъемкой, показали, что первым событием этого извержения было природное явление, никогда ранее не наблюдавшееся, — гигантский обвал-оползень северного склона вулкана объемом 2.5 км^3 . Часть постройки в виде обломочной лавины со скоростью до 80 м/с распространилась по долинам северного подножья вулкана. Через 30 с после обвала на вулкане произошел катастрофический направленный взрыв, поваливший лес на площади 600 км^2 , а затем последовало девятичасовое плининское извержение, названное в честь Плиния Младшего, описавшего мощное извержение Везувий в 79 г. н.э., во время которого сформировалось вулканическое облако высотой до нескольких десятков км, откладывавшее слой пемзового гравия (лапилли) толщиной до нескольких метров. В результате пароксизма на Сент-Хеленсе образовался подковообразный кратер поперечником 2 км, в котором начался



Александр Борисович Белоусов и Марина Геннадьевна Белоусова, кандидаты геолого-минералогических наук, старшие научные сотрудники Института вулканической геологии и геохимии Дальневосточного отделения РАН (г.Петропавловск-Камчатский). Область научных интересов — вулканология.



Схема расположения вулканов-объектов исследования.

длительный процесс медленного выжимания купола вязкой лавы среднего состава (60—64% SiO₂).

Материал лавины Сент-Хеленса своим грубообломочным составом и плохой сортировкой оказался сходным с материалом ряда других типов вулканогенных отложений. По этой причине отложения доисторических вулканических обвалов не были известны до 1980 г. — просто они интерпретировались в большинстве случаев как морены или грязевые потоки. Изучение обвала Сент-Хеленса позволило выделить ряд специфических признаков таких отложений, по которым можно уверенно диагностировать древние вулканические обрушения. Один из основных признаков обломочной лавины — неполное смешение материала: геологические тела, слагавшие обвалившуюся постройку (купола, дайки, слои лавы и пирокластики), в процессе обрушения интен-

сивно дробятся и деформируются, но не перемешиваются. В результате в обнажениях лавины виден узор из разноцветных, причудливо изогнутых линз разнородного материала. Изучение этого узора позволяет даже восстановить геологическое строение обвалившейся постройки. После извержения Сент-Хеленса начались интенсивные поиски вулканических обвалов по всему миру. Исследования показали, что крупномасштабные обрушения части конуса обычны в истории стратовулканов¹.

Анализ литературных данных позволил предположить, что в XX в. было еще три случая обрушений на вулканах: Харимкотане — в 1933 г., Безымянном — в 1956 г. и Шивелуче — в 1964 г. — все в России, в пределах Курило-Камчатской островной дуги. Так как обрушения, подобные Сент-Хеленсу, произошли в ходе сильных эксплозивных извержений, но с близкого расстояния не наблюдались, отложения обвалов были описаны под названием «агломерат направленного взрыва» и интерпретировались как материал старой постройки вулкана, выброшенный взрывом по баллистическим траекториям на расстояния в десятки километров². Такая интерпретация сильно завышала оценки энергии вулканических взрывов и препятствовала пониманию механизма этих извержений. Несмотря на ряд устаревших положений, книга Г.С.Горшкова, по признанию американских вулканологов, была у них «настолярной» во время работы на Сент-Хеленсе³.

Если об отложениях вулканических обвалов уже многое известно, то о том, как они соотносятся с извержениями, т.е. в какой момент происходят и как влияют на дальнейший ход извержения, данных (за исключением

¹ Siebert L // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1964. У.22. Р.163—197.

² Горшков ГС, Богоявленская Г.Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения (1955—1963 гг.). М., 1965.

³ Gorshkov G.S. // Bull. Volcanol. 1959. V.20. P. 77—109.



Первое изображение вулкана Харимкотан. Рисунок выполнен в 1805 г. художником Тиллезиусом — участником кругосветного путешествия капитана Крузенштерна.

ВУЛКАН ХАРИМКОТАН

Харимкотан (или вулкан Севергина) представляет собой необитаемый, округлый в плане остров-вулкан диаметром около 10 км, расположенный в северной части Курильской островной дуги. Первые данные об острове дал казак Игнатий Козыревский. В текстах «Чертежа морским островам», составленного в 1713 г., он приводит краткое, но точное описание вулкана, находящегося в состоянии длительного извержения: «Остров Араумакутан горит, и люди не живут». Кроме того, имеются сообщения об извержениях вулкана в 1846, 1883, 1931, 1933 гг. Первое изображение вулкана принадлежит художнику экспедиции Крузенштерна⁴, Тиллезиусу. На его рисунке видны обрывистые берега острова и крутая заостренная вершина.

В восстановлении последовательности событий извержения 1933 г. мы использовали свидетельства семьи Такаки — японских метеорологов⁵, зимовавших на острове в доме, расположенном в 4.5 км к северо-западу от кратера. По их данным, с осени 1932 г. на острове происходили частые землетрясения. Извержение началось 8 января 1933 г. в три часа ночи и продолжалось до 13 января. Во время извержения отмечено несколько волн цунами высотой до 9—20 м. К сожалению, это почти все, что можно извлечь из их записей о

Сент-Хеленса) почти не было. Например, было непонятно, почему на Сент-Хеленсе за обвалом последовал мощный направленный взрыв с выбросом 0,2 км³ магматического материала, а на вулкане Бандай (Япония) в 1888 г. после обвала произошла только слабая фреатическая эксплозия (выброс пара и старых пород вулкана). Известны случаи, когда крупные обрушения вулканов вообще не сопровождалось извержением. Эти вопросы имеют важное практическое значение, так как лежат в основе районирования вулканической опасности.

Мы попытались восстановить характер и последовательность событий упомянутых выше трех извержений XX в., в ходе которых происходили обрушения. Главный источник информации — отложения извержений и последовательность их напластования в сопоставлении с имеющимися данными наблюдений процессов извержений. Был собран большой фактический материал как о вулканических обвалах, так и о различных типах пирокластических отложений. Особенно интересные данные получены о материале направленного взрыва вулкана Безымянный. Достаточно сказать, что до наших исследований отложения вулкана Сент-Хеленс были единственными детально изученными продуктами направленного взрыва,

⁴ Atlas zur Reise um die Welt des Capitans Kruzenstern Petersburg, 1814.

⁵ Miyatake K. // Bull. Volcan. Soc. Japan 1934 V.2.



Берег Тихого океана, образованный обломочной лавиной вулкана Харимкотан в 1933 г. Для поверхности отложений характерны многочисленные конические холмы и озера. В правой части снимка — уступ океанского берега, существовавшего до 1933 г.

Здесь и далее цветные фото А.Б.Белуосова

процессе извержения, так как большую их часть составляют молитвы. Наиболее информативные записи; 8 января: "Извержение, цунами, гром. Бог спасет нас, Вечером огонь, как будто вода, течет из кратера"; 9 января: «Стало еще хуже. Дождь из камней. Мы молимся».

В 60-х годах вулкан был бегло осмотрен Г.С.Горшковым⁶, который отнес извержение 1933 г. к типу «направленного взрыва» и предположил взрывы и в прошлом.

На остров, в бухту Севергина, недалеко от развалин дома Такаки и заброшенной погранзаставы советско-

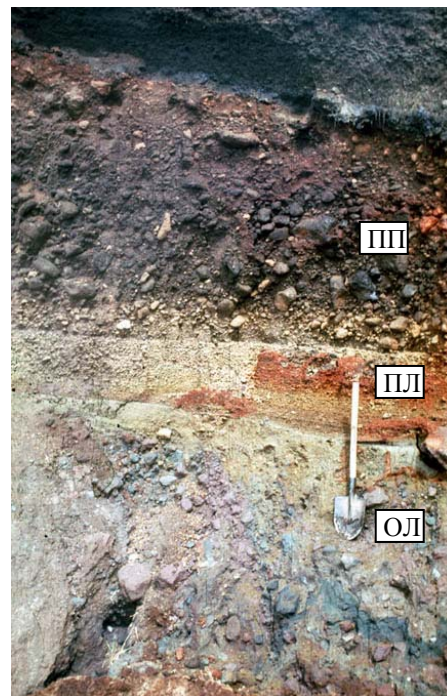
⁶ Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М., 1967.

го периода, нас высадила пограничная сторожевая корабль "Сахалин". В течение месяца, проведенного на острове, были детально изучены отложения 1933 г. и нескольких древних обрушений вулкана. Первым событием извержения 1933 г. был обвал объемом 0.4 км³ (4% от общего объема постройки вулкана). Его грубообломочные отложения, представленные материалом постройки вулкана, толщиной до 20 м и с характерным холмистым рельефом поверхности образуют широкий язык, вдающийся в воды Тихого океана. Вхождение обломочной лавины в океан отодвинуло на 1 км береговую линию и стало причиной цунами, описанного Такаки. Слой морской гальки и валунов, выброшенных этой огромной волной, обнаружен нами на северном берегу острова. На отложениях обломочной лавины залегает материал пирокластического потока, толщиной до 5 м и объемом 0.03 км³. Во время извержения это был раскаленный поток пирокластики, распространявшийся вниз по склону вулкана, который Такаки описали как «огонь,



Вулкан Харимкотан. Вид с востока, 1994 г. Подковообразный кратер, образовавшийся и 1933 г., после извержения был частично заполнен куполом (черного цвета). На переднем плане — отложения пирокластического потока 1933 г.

текущий из кратера». Завершало пароксизм плининское извержение, продолжавшееся до 13 января. "Дождь из камней" — куски пемзы, выпадавшие на землю из тучи извержения — покрыл северную половину острова чехлом бомб и лапилли толщиной до 1 м. После пароксизма высота вулкана уменьшилась с 1213 м до 1145 м, и в новом подковообразном кратере диа-



Отложения обломочной лавины (ОЛ) и последовавшего за ней плининского извержения — пемзовые лапилли (ПЛ) и пирокластический поток (ПП) вулкана Харимкотан. Их возраст — 2000 лет.

метром 1.7 км в течение нескольких месяцев происходило выжимание купола лавы среднего состава (с содержанием SiO_2 59%).

Частые землетрясения перед извержением, о которых сообщали Такаки, вероятно, были вызваны внедрением порции магмы под вулканом. Однако в их записях нет каких-либо упоминаний о вулканической активности до пароксизма 8 января, а в отложениях обломочной лавины отсутствует свежий магматический материал. Скорее всего, в отличие от вулкана Сент-Хеленс, обрушение произошло, когда магма находилась еще на достаточно большой глубине и не успела внедриться в постройку вулкана. Это объясняет, почему в ходе извержения Харимкотана за обвалом не последовало катастрофического направленного взрыва: в его постройке не было магмы — того «заряда», который при сбросе литостатического давления (т.е. давления вышележащих горных пород) в результате обвала дал направленный взрыв на Сент-Хеленсе. На Харимкотане только через некоторое время после обрушения магма прорвалась к поверхности, вызвав извержение, по разрушительной силе намного слабее направленного взрыва Сент-Хеленса. Это спасло жизнь семьи Такаки.

В северо-западном секторе вулкана видны следы частично погребенного подковообразного кратера, от которого к Охотскому морю спускается язык обвалных пород, радиоуглеродный возраст которых около 2000 лет. Отложения извержения, сопутствовавшего обрушению, прекрасно сохранились. Первым событием, как и в 1933 г., был обвал, после которого последовательность событий стала обратной: сперва произошло плинианское извержение, оставившее в северо-западном направлении слой пемзовых лапилли толщиной до 1 м., а на заключительной стадии появились пирокластические потоки. В обрывах острова нами было встречено еще несколько выходов отложений древних вулканических обвалов — обрушения

были обычны в истории вулкана Харимкотан.

ВУЛКАН БЕЗЫМЯННЫЙ

Вулкан Безымянный расположен в центральной части Камчатского п-ова. Маленький (абсолютная высота 3085 м) по сравнению с окружающими гигантами Ключевской группы, считавшийся потухшим, вулкан до 1955 г. полностью оправдывал свое название. Единственным, кто считал его действующим, был Б.И.Пийп. Он писал: «Сохранность кратера, наряду с другими соображениями геологического порядка, дают нам основание рассматривать Безымянный как недавно потухший или, быть может, не совсем потухший»⁷. Позднее было определено, что вулкан находился в покое около 1000 лет⁸.

29 сентября 1955 г. под вулканом было зафиксировано первое землетрясение. Последующее развитие событий удивительно сходно с извержением Сент-Хеленса 1980 г.: рой вулканических землетрясений (23 дня), пепловые выбросы и вздутие восточного склона (5 месяцев), внезапное сильное взрывное (эксплозивное) извержение 30 марта 1956 г., сформировавшее подковообразный кратер поперечником 1.5 км. и затем длительное, продолжающееся до настоящего времени, выжимание купола вязкой лавы.

Линейный монтер В.П.Сорокин стал широко известным в кругу вулканологов благодаря Горшкову, опубликовавшему его наблюдения начала пароксизма, в дальнейшем тиражированные во многих учебниках. Сорокин, находясь в доме, почувствовал «давление на уши» и сразу же понял — что-то случилось на вулкане. Выбежав на улицу, он увидел над вулканом косо направленное к востоку облако взрыва. Из этого рассказа Горшков понял, что первый взрыв извержения

⁷ Пийп Б.И. // Бюл вулк. ст. на Камчатке. 1946. № 13.

⁸ Брайцева О.Д., Мелекесцев ИВ., Богоявленская Г.Е., Максимов А.П. // Вулканология и сейсмология. 1990. № 2. С.3—22.



Вулкан Безымянный до извержения 1956 г. Вид с востока.

Фото Б.И.Пуйна

был не вертикален, и ввел термин "направленный взрыв", сегодня принятый во всем мире.

Изучение отложений извержения 30 марта 1956 г. Безымянного показало, что первым событием пароксизма было обрушение-оползень восточного склона постройки вулкана объемом 0.5 км^3 (около 10% первоначального объема всей постройки). Устойчивость вулкана была нарушена внедрением в его постройку порции магматического расплава на докульминационной стадии извержения. Толчком к обвалу послужило сильное вулканическое землетрясение в 17 час 11 мин по местному времени. Обвал трансформировался в обломочную лавину, которая образовала три узкие ветви, вложенные в речные долины восточного склона вулкана. Максимальный путь (22 км) прошла центральная ветвь. По высоте заплеска лавины на борту речных долин, в местах их крутых поворотов, мы определили, что ско-

рость ее движения превышала 60 м/с. В процессе распространения обломочная лавина сдирала и толкала перед собой материал подножья вулкана (снег, почву, растительность). Этот материал образовал мощные грязевые потоки длиной более 80 км. Обрушение вулкана сняло литостатическое давление с магмы, внедрившейся в его постройку до пароксизма. Это вызвало катастрофический направленный взрыв, который и наблюдал Сорокин. Выброшенная таким взрывом горячая смесь газа и пирокластики оказалась тяжелее воздуха и не всплыла в атмосфере как облако обычных вулканических взрывов, а образовала высокоскоростной турбулентный поток (пирокластическую волну), распространившийся вниз по склону вулкана в восточном направлении. Этот поток повалил лес на площади 500 км^2 , оставив около 0.4 км^3 пирокластического материала, сходного с отложениями направленного взрыва вулкана Сент-Хеленс. Характер обугливания обломков древесины, заключенных в отложения, позволяет оценить температуру облака направленного взрыва в $300\text{--}400^\circ\text{C}$. На завершающей стадии пароксизма про-



Вулкан Безымянный после извержения 1956 г. Вид с востока, 1994 г. Подковообразный кратер вулкана, образованный в 1956 г., заполнен куполом, формирование которого продолжается по настоящее время.

изошло извержение пирокластических потоков объемом 0.5 км³.

На вулкане Безымянном не найдено отложений древних обвалов. Вероятно, обрушение 1956 г. было первым в его истории.

ВУЛКАН ШИВЕЛУЧ

Огромный вулканический массив Шивелуча возвышается среди болот Центрально-Камчатской депрессии, в 100 км севернее вулкана Безымянного. Исторические извержения происходили только на Молодом Шивелуче — конусе высотой 2763 м, расположенном в открытой на юг подковообразной кальдере Старого Шивелуча — потухшего вулкана высотой 3335 м. В 1964 г. вершина Молодого Шивелуча состояла из группы куполов, последний из которых сформировался в 1946—1949 гг.

Извержение 12 ноября 1964 г. предварялось длительным роем землетрясений⁹, которые стали отмечаться под вулканом с января 1964 г. За несколько часов до начала извержения толчки происходили непрерывно. Некоторые из них ощущались в пос.Ключи, откуда Шивелуч прекрасно виден и где расположена Камчатская вулканологическая станция Академии наук.

Извержение 12 ноября было мощным и коротким — всего около одного часа. Тучу извержения, начавшегося рано утром, понесло на восток. В пос. Усть-Камчатск начался сильнейший пеплопад, и местные власти связались с Институтом вулканологии в Петропавловске-Камчатском. Директор института Пийп еще не имел информации об извержении. Он позвонил по телефону начальнику вулканической станции А.Е.Святловскому и стал интересоваться Шивелучем. Святловский выглянул в окно, посмотрел

⁹ Горшков ГС, Дубик Ю. М. Направленный взрыв на вулкане Шивелуч // Вулканы и извержения. М, 1969. С.3—37.



Вулкан Шивелуч. Вид с вертолета, 1994 г. В подковообразном кратере 1964 г. на вершине Молодого Шивелуча расположен купол, сформировавшийся в 1993—1994 гг. На заднем плане — постройка Старого Шивелуча.

на станционного коня по кличке Шивелуч и ответил, что тот, как ему и полагается, пасется. В разговоре наступила долгая пауза, извержение к этому моменту закончилось. Эта история объясняет, почему при восстановлении событий пароксизма 12 ноября нам пришлось пользоваться, как и в предыдущих случаях, свидетельствами случайных наблюдателей, опубликованными Б.И.Пийпом и Е.К.Мархининым¹⁰.

¹⁰ Пийп Б.И., Мархинин Е.К. // Бюл. вулк. ст. 1965. № 39. С.28-34.

Обрыв Главной вершины вулкана Шивелуча высотой 1,5 км, образованный в результате обрушения части вулканической постройки около 10 тыс. лет назад.



Определение точного времени происшедших событий оказалось возможным благодаря тому, что приборы вулканической станции записали воздушные и сейсмические волны, генерированные извержением¹¹.

Обвальные отложения объемом 1.5 км³ (15% объема всей постройки Молодого Шивелуча) слагают самую нижнюю часть разреза отложений пароксизма 12 ноября. Они образуют широкий язык площадью 98 км² и толщиной 2—15 м. Обвал был первым событием извержения. Вероятно, обрушение спровоцировано землетрясением, состоявшимся в 7 час 07 мин. Отложения обломочной лавины перекрыты слоем тонкозернистого пепла толщиной до 8 см, содержащего многочисленные аккреционные лапилли — круглые «градины» пепла, слипшегося от избытка влаги в туче извержения. Состав и морфология частиц показывают, что пепел образовался в результате дробления твердого, местами окисленного и гидротермально измененного материала, слагавшего старые купола Шивелуча. Вероятно, древний пепел был выброшен взрывом, вызванным снятием литостатического давления с гидротермальной системы вулкана в результате обрушения. На отложениях этого пепла залегает слой пемзовых лапилли плинианского извержения, которое, вероятно, началось в 7 час 20 мин. В этот момент наблюдалось появление раскаленных выбросов, и сейсмографы вулканической станции начали регистрировать вулканическое дрожание — непрерывные колебания почвы. Завершают разрез пирокластические потоки толщиной до 20 м. Их образование происходило на завершающей стадии пароксизма с 7 час 47 мин до 8 час 22 мин, когда регистрировались наиболее мощное вулканическое дрожание и воздушные волны, а наблюдатели отмечали (как и Такаки на Харимкотане) «течение огня» по склону вулкана. В ходе извержения не было

направленного взрыва, аналогичного взрывам на Сент-Хеленсе и Безымянном. Последовательность событий близка сценарию извержения 1933 г. вулкана Харимкотан. Причина та же — отсутствие магмы в постройке вулкана в момент обрушения. Снятие литостатического давления привело только к вскипанию воды в небольшой гидротермальной системе вулкана и выбросу пара и тонкозернистого пепла. Магма достигла поверхности только через 13 мин после обвала, вызвав обычное плинианское извержение. В результате на месте куполов Молодого Шивелуча образовался подковообразный кратер поперечником 1.7 км, открытый на юг. В 1980—1981 и 1993—1994 гг. в кратере происходило выжимание вязкой лавы, сформировавшей новый купол.

В обрывах глубоких каньонов южного подножья Шивелуча вскрываются отложения восьми обвалов вулкана. Древнейший из них произошел предположительно около 10 000 лет назад, образовав кальдеру Старого Шивелуча. Отложений извержения, связанного с этим событием, не сохранилось. Остальные обвалы связаны с формированием постройки Молодого Шивелуча. Радиоуглеродным датированием установлен их возраст: 5700, 3700, 2600, 1600, 1000 и 600 лет. Последовательность событий во время этих обрушений всегда была одинаковой, как в 1964 г.: обвал постройки вулкана объемом 1—2 км³, слабый фреатический взрыв и затем плинианское извержение с образованием пирокластических потоков.

Итак, наши исследования показали, что в ходе извержений вулканов Харимкотана (1933), Безымянного (1956) и Шивелуча (1964) происходили крупномасштабные обвалы вулканических построек. Причины обрушений на вулканах могут быть различными, но в большинстве случаев их постройки теряют устойчивость под воздействием внедряющейся вязкой магмы в процес-

¹¹ Токарев П.И. // Изв. АН СССР Сер. Физика Земли. 1967. № 9. С. 11—22.

се подготовки нового извержения (посредством деформаций, сейсмичности, изменения гидрогеологических условий), как произошло на вулканах Харимкотан, Безымянный, Шивелуч и Сент-Хеленс.

Причина обрушения отражается в событиях непосредственно за ним следующих. Если обрушение произошло под действием внедряющейся магмы, то резкое снятие литостатического давления вызывает эксплозивное извержение магматической природы. При этом глубина нахождения расплава характеризует тип извержения. Глубокое положение расплава в момент обрушения приводит в большинстве случаев к плининанскому извержению с образованием пирокластических потоков (Харимкотан 1933 г. и Шивелуч 1964 г.). Нахождение расплава в постройке вулкана в форме купола добавляет к указанному сценарию катастрофический направленный взрыв, следующий сразу за обрушением (Безымянный 1956 г. и Сент-Хеленс 1980 г.). Наши данные показывают, что в подавляющем большинстве случаев постройка вулкана теряет устойчивость и обваливается еще при глубоком положении расплава, и поэтому направленные взрывы — редкое явление. Если в постройке вулкана существует гидротермальная система, то сразу после обвала происходит также взрыв, мощность которого зависит от ее параметров. Приведенные сценарии относятся к случаям извержения магм кислого и среднего составов (содержание $\text{SiO}_2 > 55\%$). Ве-

роятно, для магм других составов (и с другими физико-механическими свойствами) характер извержения после обрушения может быть существенно иным.

В некоторых случаях потеря устойчивости вулкана происходит в результате длительного действия термальных растворов, медленно превращающих изначально прочные породы в глину. Обрушения сопровождаются только фреатическими взрывами без выброса свежего магматического материала (обвал вулкана Бандай в 1988 г.). Обрушения на потухших вулканах из-за неравномерной эрозии постройки не сопровождаются какой-либо вулканической активностью (обвал вулкана Камень на Камчатке 1000 лет назад). Во многих случаях толчком к обрушению служат вулканические и, возможно, тектонические землетрясения.

Изучение воздействия крупномасштабных обвалов на динамику извержений еще только начинается. Дальнейшие работы должны идти как по пути сбора дополнительной геологической информации, так и по пути физического и математического моделирования быстрой разгрузки магматической и гидротермальной систем вулкана.

Исследования выполнены при поддержке Международного научного фонда, фонда гражданских исследований и развития (CRDF) и Национального научного фонда США (NSF). И стабильно не поддерживаются Российским фондом фундаментальных исследований.