

жс 10496

ISSN 0016-7886

**ГЕОЛОГИЯ  
И  
ГЕОФИЗИКА**

**8**

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА» СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

Н. А. ЛОГАЧЕВ, С. И. ШЕРМАН, К. Г. ЛЕВИ

### ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЛИТОСФЕРЫ СИБИРИ В КАЙНОЗОЕ

Для оценки геодинамической активности литосферы предлагается использовать интегральный показатель, который образуют шесть основных признаков, выраженных в количественной форме: амплитуды вертикальных и горизонтальных движений коры, мощность литосферы, сейсмический потенциал (максимальная магнитуда известных землетрясений), тепловой поток и интенсивность распространения кайнозойского вулканизма. Количественные вариации признаков позволяют выделить пять степеней активности литосферы. Приводится карта геодинамической активности литосферы Сибири, на которой по интегральному показателю оконтурены районы с различной степенью активности.

Современная геология располагает обширным арсеналом геолого-геофизической информации, нуждающейся в комплексном подходе к ее анализу и интерпретации. Такой подход стал возможным сравнительно недавно в связи с появлением и развитием в прошлом десятилетия нового геолого-геофизического направления — геодинамики. Это направление нацелено на изучение глубинных процессов, приводящих в движение крупные блоки литосферы и большие массы вещества в глубоких оболочках Земли, а также отражения этих процессов в ее поверхностной структуре.

В основе геодинамических исследований лежат методы геотектоники, механики и гидродинамики. Геодинамика в большей степени, чем тектонофизика, использует данные петрологии — одной из главных основ геологии как науки. В координатах пространства и времени геодинамическая ситуация, естественно, не остается постоянной.

При рассмотрении геодинамики литосферы разные авторы включают в анализ различное число геолого-геофизических характеристик, которые, на их взгляд, наиболее полно отражают возбужденное состояние вещества литосферы. Отсутствие достаточного опыта в настоящее время не позволяет предложить тот оптимум геологических и геофизических показателей, который был бы достаточным для характеристики геодинамической активности литосферы. Так, например, Ф. Ф. Шаффер [20] использовал 17 признаков для оценки возбужденного состояния литосферы. Предлагалось учитывать значение силы тяжести в редукции Буге, значения добротности, сейсмичность, магматизм, степень раздробленности земной коры разломами и др. Это — широкий комплекс признаков, но они не равноинформативны по значимости, и их большое количество не обеспечивает необходимой полноты информации о геодинамической активности. Так, сейчас уже совершенно очевидно, что последняя должна быть «привязана» ко времени. При оценке, например, кайнозойской геодинамической активности литосферы не следует пренебрегать характеристиками неотектонических структур и количественными параметрами тектонических движений. Именно движения коры как составная часть динамики литосферы, выраженные через векторы и их числовые значения, являясь наиболее быстрым и непосредственным результатом глубинных механических и физико-химических преобразований.

В силу тех или иных причин для общей характеристики геодинамической обстановки на разных временных срезах могут быть использованы

различные наборы параметров. Так, например, для оценки геодинамической активности литосферы в геологическом прошлом приоритеты должны быть отданы геологическим параметрам крупных тектонических структур и составляющих их элементов. Геофизические характеристики при этом играют вспомогательную роль. И все же неполнота набора признаков сильно ограничивает возможности анализа геодинамической активности в далеком прошлом. Поэтому, вероятно, начинать работы по изучению и последующему картографированию геодинамической активности литосферы целесообразно именно с кайнозойского временного среза, так как совокупность основных параметров, определяющих эту активность, может быть представлена не только в качественном, но и, что очень важно, в количественном выражении.

Для общей характеристики геодинамической обстановки в кайнозое и районирования территории по степени геодинамической активности предлагается использовать интегральный показатель, в основу которого положено несколько ведущих признаков, определяющих геодинамическую обстановку по непосредственно регистрируемым структурам, физическим полям и процессам на поверхности Земли. Естественно, что одних этих данных недостаточно для характеристики геодинамики в ее полном объеме. К сожалению, пока от подобного косвенного способа анализа глубинных процессов не уйти, хотя очевидно, что исчерпывающая характеристика геодинамической активности литосферы может быть получена в идеальном случае при прямом измерении параметров по всему ее объему.

Главные требования к признакам геодинамической активности, которые можно взять за основу геодинамического районирования, сформулированы В. В. Белоусовым и Н. И. Павленковой [1] при выделении типов земной коры. Эти признаки должны: а) устойчиво характеризовать достаточно крупные области и изменяться при переходе от одной структурной зоны к другой; б) обладать количественной определенностью и достоверно устанавливаться из наблюдений без применения априорных представлений о модели среды; в) быть связанными с определенной геологической обстановкой, коррелировать или быть в согласии с другими признаками, типичными для данной ситуации; г) не являться данными единичных наблюдений, т. е. случайными величинами.

Основным признаком при геодинамическом районировании следует считать крупные геологические структуры и порождающие их движения. Именно они наиболее непосредственно и быстро отражают сложные перестройки в недрах Земли.

Масштабы структур и образующих их движений парагенетически связаны с толщиной литосферы. Действительно, в природе и эксперименте установлено, что между толщиной деформируемого тела (пласта) и развивающимися в нем структурами имеется определенная связь. Таким образом, можно утверждать, что в пределах континентов структуры с поперечником более 40—70 км (минимальная толщина континентальной литосферы в рифтовых зонах) пропорциональны толщине литосферы или по крайней мере большей ее части. Наличие подобных по размеру структур свидетельствует об активизации всего разреза литосферы. Одновременно толщина литосферы позволяет судить о потенциальных возможностях тех или иных территорий к тектонической активизации, т. е., чем мощнее литосфера, тем большие по площади территории могут быть одновременно вовлечены в движение.

В то же время имеется обратная зависимость между толщиной литосферы и степенью ее геодинамической активности в кайнозое. Исключением из этого правила являются области континентальной коллизии, где, из-за поддвига литосферы или в силу иных причин, высокая геодинамическая активность выступает в почти прямой взаимосвязи с утолщением литосферы. В то же время толщина литосферы удовлетворительно согласуется с ее возрастом: чем древнее литосфера, тем она, как правило, толще [4]. Некоторыми исследователями [11] предполагается обратная связь между мощностью литосферы и подстилающей ее астеносферы.

Результатом деформации литосферы в целом и особенно ее верхней «хрупкой» части является сейсмическая активность. Она несет практически немедленную информацию об образовании очага землетрясения как результата движений и деформаций определенного объема литосферы, а также резких подвижек в очаговой области. Магнитуда землетрясений при прочих равных условиях пропорциональна скорости деформирования, размерам области накопления напряжений, мощности деформируемого слоя, размерам структур, глубине очага и некоторым другим параметрам. Важно, что потенциальная магнитуда землетрясений пропорциональна интенсивности тектонического процесса в литосфере. Поэтому зафиксированную за историческое время максимальную магнитуду, или сейсмический потенциал\*, можно рассматривать в качестве одной из комплексных физических характеристик геодинамики литосферы, и особенно ее современной активности. Эта мысль достаточно четко недавно сформулирована В. В. Белоусовым и В. Н. Шолпо [2]: «...В землетрясении... мы получаем право видеть... кратковременное сиюминутное выражение тектонических движений. Землетрясения дают возможность как бы анатомировать тектонические движения...» [2, с. 48].

Об активности литосферы однозначно свидетельствуют и проявления магматизма. По площадям распространения и объемам кайнозойских базальтов и вулканических построек также можно оценивать степень кайнозойской геодинамической активности. Вулканизм проявляется дискретно, но характеризует длительный период однонаправленного процесса подготовки условий для образования родоначальных расплавов в верхней мантии и путей их проникновения на земную поверхность.

В определенной мере показателем геодинамической активности литосферы является плотность теплового потока. По сравнению с характеристиками движений или сейсмичностью передача глубинной тепловой энергии отстает во времени от других динамических процессов в литосфере. Но активизация литосферы не развивается и не затухает мгновенно. Можно показать, что разогревание литосферы требует сотен тысяч лет и более, а длительность прогрева при постоянстве температуры на ее подошве пропорциональна толщине литосферы [6, 7]. Кайнозойский вулканизм и тепловой поток необходимо рассматривать как процесс и физическое поле, отражающее геодинамическую активность за продолжительный период времени. Нельзя исключать из рассмотрения и такую ситуацию, когда локализованный на небольших площадях повышенный тепловой поток является результатом неравномерного остывания больших по площади территорий и, естественно, совершенно не свидетельствует о современной активизации. Следовательно, только по величине теплового потока нельзя судить о геодинамической активности литосферы. Делать заключение об этом можно только по синхронному проявлению комплекса признаков.

Возникает необходимость отображения перечисленной геолого-геофизической информации в виде некоторого обобщенного показателя, учитывающего возможные вариации образующих его параметров. Естественный подход к получению такого показателя с позиций множественного корреляционно-регрессионного анализа. Но для его осуществления необходимо знать, хотя бы в условных единицах, численное значение величины геодинамической активности литосферы. Поэтому математический подход к анализу данных в рассматриваемом случае пока не пригоден.

Учитывая неприемлемость статистического подхода к преобразованию перечисленных признаков, предпринята попытка полуколичественно выразить степень кайнозойской активности литосферы через комплексный качественный критерий, являющийся в данном случае интегральным показателем признаков, представленных в количественной форме: ампли-

\* Сейсмический потенциал — максимально возможная магнитуда землетрясения при определенном уровне геодинамической активности. В настоящей работе он приравнен к максимальной зафиксированной магнитуде по [14].

Главные геолого-геофизические показатели геодинамической активности литосферы

Интегральный показатель степени активности литосферы	Амплитуды вертикальных неотектонических движений, м	Амплитуды горизонтальных неотектонических движений, м	Сейсмический потенциал (максимальная магнитуда известных землетрясений)	Площадь распространения кайнозойских магматических образований, %	Плотность теплового потока, мВт/м <sup>2</sup>	Примерная мощность литосферы, км
1 очень низкая	250	10 <sup>0</sup>	—	—	≤30	≥200
2 низкая	250—500	10 <sup>1</sup>	—	—	30—50	150—200
3 средняя	500—1000	10 <sup>2</sup>	4	1 (редкие вулканы)	50—70	100—150
4 высокая	1000—2000	10 <sup>3</sup>	<4—6	1—10	70—90	70—100
5 очень высокая	2000	10 <sup>4</sup>	>6	>10	>90	70 * или 150 **

Примечание. Прочерк означает отсутствие данных.

\* Как правило, при нормальном развитии литосферы;

\*\* При «сдвоении» литосферы в зонах континентальной коллизии.

туд движений, сейсмического потенциала, примерной мощности литосферы, плотности теплового потока и площади распространения кайнозойских магматических образований. При таком подходе отсутствие данных по одному из признаков или их отклонение от среднего значения не влияют на интегральный показатель.

Из анализа признаков можно наметить пять уровней градации степени геодинамической активности литосферы в кайнозое: очень низкая, низкая, средняя, высокая и очень высокая, которым соответствуют конкретные средние значения численных характеристик отдельных параметров (см. таблицу). При такой постановке вопроса суммарные результаты геодинамических исследований через интегральный показатель можно изображать на карте — старейшем и основном геологическом документе. Интегральный показатель позволяет суммировать большую информацию в одном условном знаке [12].

Принципы и приемы составления карт геодинамической активности пока недостаточно разработаны и находятся в состоянии логико-методического оформления. Может быть несколько подходов к графическому отображению степени и характера геодинамической активности в зависимости от целей и задач исследования.

Удачной следует считать попытку составления геодинамической карты [5], под редакцией А. А. Смыслова, на которой в пределах территории СССР выделены геодинамические системы по преимущественному типу движений (поднятия, опускания), по морфологии (полигональные, линейные), а также по возрасту консолидации литосферы (древняя, зрелая, молодая). При чтении карты по разным критериям выделяются несколько типов геодинамических систем, сформировавшихся в разное время на литосфере разной стадии зрелости. Возраст, а точнее, время «геодинамического» развития красной нитью проходит через всю систему условных обозначений карты.

Другой вариант подхода к отображению геодинамической активности литосферы предложили Б. В. Ермаков, В. Н. Семов и Ю. К. Щукин [8]. Они приняли для оценки современной тектонической активности литосферы три ведущих геофизических параметра: мощность земной коры, скорость продольных волн вблизи поверхности Мохэ и тепловой поток. Комплексный анализ этих характеристик позволил авторам построить карту активности (состояния вещества) верхов мантии, выделив четыре основных типа областей: слабоактивного состояния вещества, активного переуплотнения вещества, активного разуплотнения в усло-

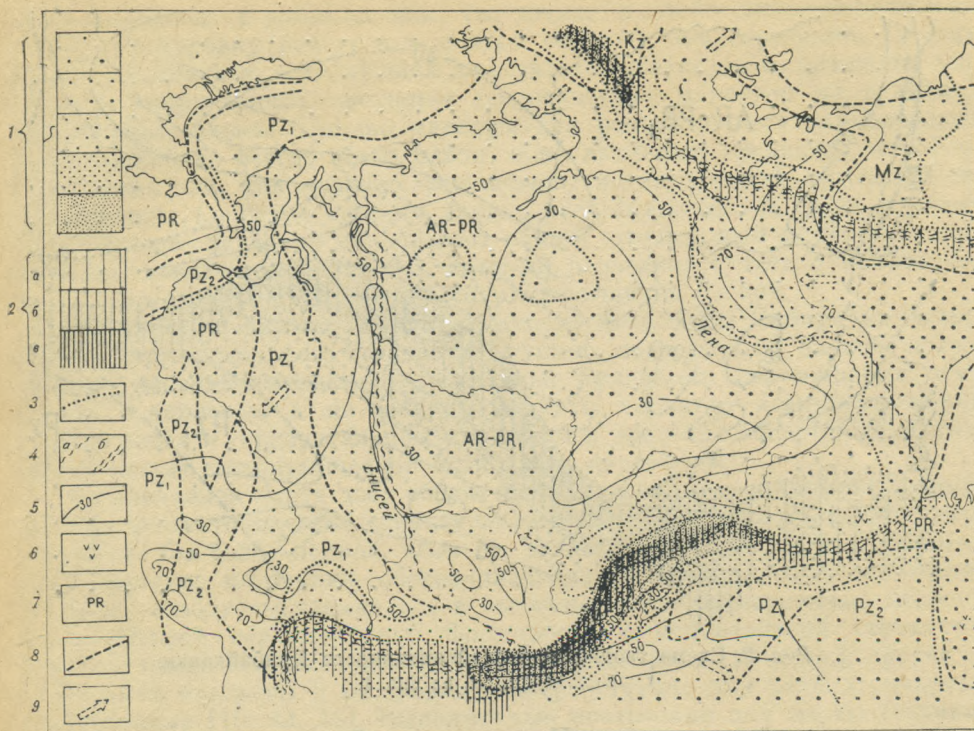


Рис. 1. Карта геодинамической активности литосферы Сибири.

1 — области с различной геодинамической активностью литосферы (сверху вниз соответственно таблице 1, 2, 3, 4, 5); 2 — зоны, в которых зарегистрированы землетрясения с магнитудой  $M$ : а) меньше 4, б) от 4 до 6, в) более 6; 3 — границы областей с разной степенью активности литосферы; 4 — границы литосферных блоков: слабоактивные (а) и высокоактивные (б); 5 — изолинии плотности теплового потока, в мВт/м<sup>2</sup>; 6 — области проявления кайнозойского магматизма; 7 — геологический возраст земной коры; 8 — границы участков земной коры с различным возрастом; 9 — предполагаемое направление относительного горизонтального перемещения литосферных блоков.

виях сжатия или условиях растяжения. При этом следует уточнить, что названные геофизические характеристики отражают современное состояние литосферы.

Учитывая опыт предшественников, а также представления об интегральном показателе геодинамической активности, изложенные выше, авторы попытались картографически отобразить активность литосферы Сибири в кайнозое.

В основу легенды карты геодинамической активности положены главные геолого-геофизические характеристики, дополненные рядом других вспомогательных обозначений (рис. 1). При составлении карты учтены материалы, опубликованные в [3, 7, 9, 14, 15 и др.]. На карте в соответствии с интегральным показателем хорошо выделяются области с разной степенью геодинамической активности. Границы между областями проведены в основном в соответствии с контурами крупных неотектонических структур, по генеральным разломам или тектоническим швам, либо по эпицентральному полю землетрясений и геоморфологической ситуации. Таким образом, интегральный показатель при проведении границ учитывается в качестве эмерджентной характеристики. Именно она по комплексу геолого-геофизических данных и конкретной неотектонической ситуации дает основание в каждом отдельном случае при проведении границы на карте ориентироваться либо на контур неотектонических структур, либо на изолинии теплового потока, либо, как уже выше говорилось, на другие показатели.

На карте кроме главного знака — интегрального показателя — изображены границы между крупными литосферными блоками. Эти границы разделяются на активные и пассивные (слабоактивные). Первый тип границ совпадает с осевой частью районов высокой и наиболее высокой

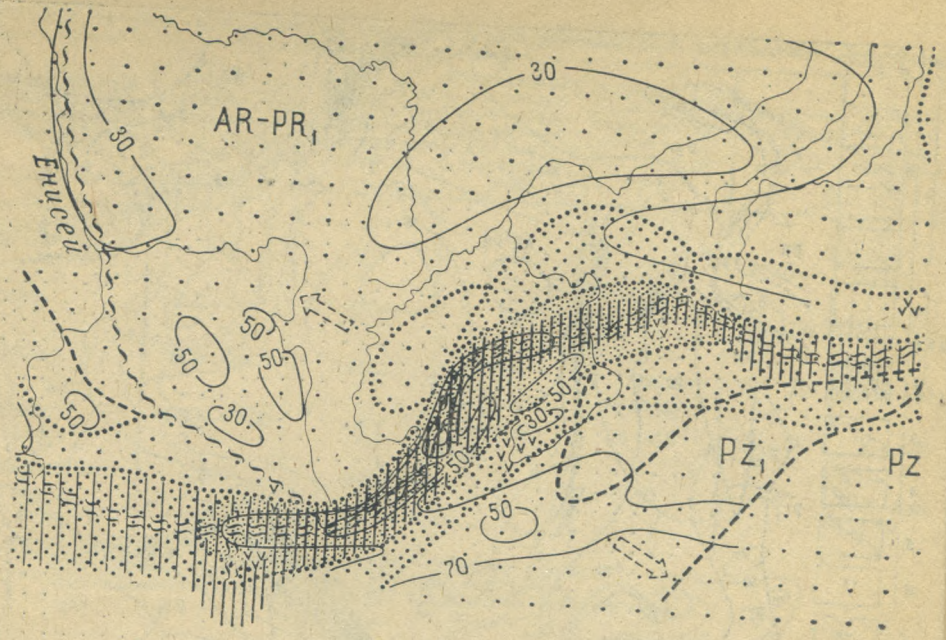


Рис. 2. Схема геодинамической активности Прибайкалья.  
Усл. обозн. см. на рис. 1.

геодинамической активности. Примером такой границы может служить Байкальская рифтовая зона. Детальные исследования показывают, что на различных ее отрезках (центральная часть, фланги) степень геодинамической активности неодинакова. Это объясняется разницей в характере деформирования литосферы, ее мощности, а также другими причинами [13, 18] (рис. 2).

Второй тип границ — слабоактивные границы — на карте отражают затухающие или слабо проявившиеся геодинамические процессы, например граница по Енисейскому разлому. В таких местах реконструкция геологической и геоморфологической обстановки свидетельствует о былой геодинамической активности, а низкий тепловой поток и отсутствие вулканизма и сейсмичности указывают на невысокую геодинамическую активность пограничной зоны сегодня и в недалеком прошлом. По-видимому, разные типы границ литосферных блоков отличаются между собой не только степенью геодинамической активности. Они отражают стадии эволюции геодинамической активности литосферы и определяют в ее верхней части проявления совершенно разных процессов. Нужно заметить, что в большинстве своем области высокой геодинамической активности литосферы, трассирующие границы между большими литосферными плитами и, по существу, отражающие характер взаимодействия между последними, хорошо согласуются со схемой активных контактов литосферы по сейсмологическим данным, рассмотренной Ю. К. Щукиным [17].

Важное значение для оценки геодинамической ситуации имеет знание об ориентировке векторов тектонических сил. О них можно судить по неотектоническим структурам и данным о кинематике движений отдельных блоков. Использовать только сведения об ориентировке напряжений в очагах землетрясений или о результатах прямых натурных измерений напряжений в горных массивах недостаточно, так как они являются «мгновенными» характеристиками в масштабе геологического времени. Совпадение или несовпадение этих определений с результатами интерпретации геолого-структурных данных не может существенно влиять на формирование окончательных представлений. Предпочтительными являются геолого-структурные данные, отражающие долговременное силовое поле, в котором формировались неотектонические структуры. В литературе имеется много примеров, когда определяющими геодинамиче-

скую обстановку в кайнозой или, что точнее, в плейстоцен-голоцене считают ориентировку векторов в очагах сильных землетрясений. С этим можно согласиться, хотя лучшим показателем, безусловно, являются сведения о направлениях смещения геологических маркеров на границах литосферных блоков. Однако маркеры для реконструкции кайнозойских перемещений не всегда легко найти, а на активных границах литосферных блоков они, как правило, затушеваны во внутренней структуре самой границы (зоны) и поэтому трудно распознаваемы. В таких случаях определяющее значение приобретает общий структурный рисунок в зоне активной межплитной границы, который позволяет судить о направленности горизонтальных движений соприкасающихся блоков.

На карте геодинамической активности литосферы Сибири показаны векторы горизонтального смещения крупных литосферных блоков, позволяющие наглядно представить основные тенденции перемещения этих блоков в кайнозой, а по таблице оценить характер взаимоотношения вертикальных и горизонтальных движений в пределах областей с различной степенью геодинамической активности литосферы.

Составленная карта дает общее представление о геодинамике формирования неотектонической структуры громадного региона. Наверное, картина была бы более полной, если бы удалось восстановить и глубинные энергетические источники, обеспечивающие геодинамическую эволюцию. По этому поводу высказывались и высказываются разноречивые мнения. Одни считают первопричиной формирования кайнозойской структуры Азии коллизию Индостанской и Евроазиатской плит [19 и др.], другие — автономные процессы в геосферах непосредственно под рассматриваемыми регионами [10, 13, 16]. Выполненные построения для карты геодинамической активности литосферы Сибири в кайнозой отражают прежде всего качественную картину сочетания количественно охарактеризованных геолого-геофизических параметров. Лучшим вариантом было бы такое решение вопроса, при котором геодинамическая активность была бы представлена численной величиной, отражающей энергию процесса. В настоящий момент эта задача не может быть решена однозначно из-за недостатка необходимой информации. Надо отметить, что попытки таких приближенных оценок уже предпринимались. В частности, Ю. К. Щукин [17] оценил количество «тектонической» энергии, выделяющейся на «активных контактах» литосферных блоков. Правда, эти вычисления выполнены с использованием только данных о сейсмическом режиме.

Предлагаемая карта геодинамической активности литосферы построена по комплексному интегральному показателю на полуквантитативной основе. Пока не удалось количественные показатели основных признаков аналитически связать с качественным показателем степени геодинамической активности. Работа над подобными способами перехода — задача ближайшего будущего. Изложенные в этой статье подходы к анализу геодинамической активности литосферы приемлемы в основном для мелкомасштабного картирования, что позволяет рассматривать такие карты в качестве обзорных. Думается, что в недалеком будущем подобные построения могут быть осуществлены и в более крупном масштабе. Для этого потребуются уточнение значимости и количества геолого-геофизических показателей геодинамической активности литосферы и отдельных частей ее разреза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусов В. В., Павленкова Н. И. Типы земной коры // Геотектоника.— 1985.— № 1.— С. 3—14.
2. Белоусов В. В., Шолпо В. Н. Сейсмология и геотектоника // Проблемы современной сейсмологии.— М.: Наука, 1985.— С. 47—56.
3. Геология и сейсмичность БАМ. Неотектоника/Шерман С. И., Леви К. Г., Ружич В. В. и др.— Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1984.— 207 с.
4. Геофизика океана. Геодинамика/Ред. О. Г. Сорохтин.— М.: Наука, 1979.— 415 с.
5. Глубинное строение и геодинамика литосферы/Ред. А. А. Смыслов.— Л.: Недра, 1983.— 276 с.



6. Гордиенко В. В. Тепловые аномалии геосинклиналей.— Киев: Наук. думка, 1975.— 141 с.
7. Дучков А. Д., Балобаев В. Т., Лысак С. В., Соколова Л. С. Тепловой поток Сибири // Геология и геофизика.— 1982.— № 1.— С. 42—51.
8. Ермаков Б. В., Семов В. Н., Щукин Ю. К. Современная тектоническая активность литосферы по геофизическим данным // Современная тектоническая активность территории СССР.— М.: Наука, 1984.— С. 8—23.
9. Казьмин В. Г. Зависимость типа рифтогенеза от условий растяжения // Тезисы докладов 27-го МГК.— М.: Наука, 1984.— Т. 3.— С. 255.
10. Кучай В. К. Астенолинзы: оро- и депрессогенез.— Геология и геофизика.— 1985.— № 7.— С. 82—91.
11. Летников Ф. А., Леви К. Г. Зрелость литосферы и природа астеносферного слоя // Докл. АН СССР.— 1985.— Т. 280, № 5.— С. 1201—1204.
12. Логачев Н. А., Шерман С. И., Леви К. Г. Геодинамическая активность литосферы территории Сибири в кайнозой // Докл. АН СССР.— 1986.— Т. 289, № 6.— С. 1458—1461.
13. Недра Байкала по сейсмическим данным.— Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1981.— 105 с.
14. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР.— М.: Наука, 1977.— 535 с.
15. Региональная неотектоника Сибири/Ред. Н. А. Логачев.— Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1983.
16. Фотиади Э. Э., Кучай В. К. Главнейшие черты современной динамики основных тектонотипов литосферы Сибири.— Геология и геофизика.— 1986.— № 1.— С. 111—119.
17. Щукин Ю. К. Геофизические исследования в проблемах геодинамики и сейсмичности // Проблемы современной сейсмологии.— М.: Наука, 1985.— С. 57—71.
18. Logatchev N. A., Zorin Yu. A. Baikal rift: active or passive?— comparison of the Baikal and Kenya rift zones // Tectonophysics.— 1983.— V. 94.— P. 223—240.
19. Molnar P., Tapponier P. Cenozoic tectonics in Asia: Effects of continental collision // Science.— 1975.— V. 189, N 4201.— P. 419—425.
20. Schäffer F. R. Perturbed mantle: A unifying characteristic of plate boundaries // Geol. en mijnbouw.— 1979.— Bd. 58, N 2.— Bl. 261—272.

ИЗК СО АН СССР  
Иркутск

Поступила в редакцию  
11 июля 1986 г.

N. A. Logachev, S. I. Sherman, K. G. Levi  
GEODYNAMIC ACTIVITY OF THE LITHOSPHERE  
OF SIBERIA IN THE CENOZOIC

To estimate the geodynamic activity of the lithosphere the integral index is introduced. It consists of 6 basic quantitative parameters: the amplitude of vertical and horizontal movements of the crust, the lithosphere thickness, the seismic potential (maximum magnitude of the registered earthquakes), heat flow and the intensity of the cenozoic volcanic activity. Quantitative variations of the characteristics allow us to define 5 degrees of lithospheric activity. Presented in the paper is the map of geodynamic activity of Siberian lithosphere, in which the areas with different degree of activity are outlined according to the integral index.

УДК 51:551.98+550.812

А. Н. ДМИТРИЕВ, С. А. АФАНАСЬЕВ

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ГЕОЛОГОРАЗВЕДКА**  
*Состояние проблемы и постановка задач*

Рассмотрены возможности математической геологии при решении острых проблем геологической разведки в нефтяной геологии. Определены три составные части геологоразведки: естественно-научная, техногеологическая и математическая. Поставлены основные задачи геологоразведки, ориентированные на оптимизацию и управление разведочным процессом по принципу максимального прироста информации в общем ходе буровых работ.

Проникновение математических методов в сферу производственной деятельности геологов становится все более глубоким и разносторонним. Это проникновение особенно актуально для решения геолого-разведочных задач. Намечившиеся тенденции развития математических средств