УДК 550.348.43 + 551.242 + 528.481

Мы окружены структурами, которые сформировались в ходе исторического развития Земли, будь то структуры, изучаемые химией, геологией или биологией. Мы должны искать их происхождение в последовательности бифуркаций.

И. Пригожин

БАЙКАЛЬСКАЯ РИФТОВАЯ СИСТЕМА: ПРИЗНАКИ НЕЛИНЕЙНОЙ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ

Ключевский А.В.

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, e-mail: akluchev@crust.irk.ru

Описаны признаки самоорганизации и нелинейности Байкальской рифтовой системы. Значительные изменения азимутов движения пунктов GPS в районе южного Байкала указывают на нелинейную геодинамику.

Ключевые слова: Байкальская рифтовая система, нелинейная геодинамика, данные GPS.

BAIKAL RIFT SYSTEM: SIGNS OF NONLINEAR SELF-ORGANIZING SYSTEM

Anatoly V. Klyuchevskii

Institute of the Earth Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 128, Lermontova Str., e-mail: akluchev@crust.irk.ru

The signs of self-organization and nonlinearity of the Baikal rift system are described. Significant changes in the azimuth movement points GPS in Southern Lake Baikal indicate nonlinear geodynamics.

Key words: Baikal Rift System, nonlinear geodynamics, GPS data

Введение

В современной науке в основе представлений о строении материального мира лежит системный подход, согласно которому любой объект, будь то атом, планета, организм или галактика может быть рассмотрен как сложное образование, включающее составные части, организованные в целое [7]. Методологическая специфика системного подхода определяется тем, что он ориентирует исследование на раскрытие целостности объекта и обеспечивающих её механизмов, на выявление многообразных типов связей сложного объекта и сведение их в единое теоретическое обобщение. Для обозначения целостности объектов в науке выработано понятие системы, которое в БСЭ имеет вид: совокупность элементов и связей между ними, образующих изолированную часть материи, которая обладает набором свойств и характеристик. Совокупность связей между элементами образует структуру системы, а устойчивые связи элементов определяют упорядоченность системы. Существуют два типа связей между элементами системы – по горизонтали и по вертикали. Связи по горизонтали – это связи координации между элементами одного порядка, и они носят коррелирующий характер: ни одна часть системы не может измениться без того, чтобы не изменились другие части. Связи по вертикали – это связи субординации, соподчинения элементов: они выражают сложное внутреннее устройство системы, где одни части по своей значимости могут уступать другим и подчиняться им. Вертикальная структура включает уровни организации системы, а также их иерархию. При классификации систем выделяются статичные и динамические системы. Для статичной системы её состояние с течением времени остаётся постоянным, а динамическая система изменяет своё состояние во времени. Поведение динамических систем описывается с помощью дифференциальных уравнений. Колебательные системы, в которых протекают процессы, описываемые нелинейными дифференциальными уравнениями, называются нелинейными системами. Свойства и характеристики нелинейных систем зависят от их состояния, а

процессы в них не удовлетворяют принципу суперпозиции. Все реальные физические системы нелинейны и их можно считать линейными лишь приближённо при малой интенсивности колебательных и волновых процессов. По характеру взаимоотношения система–среда системы делятся на закрытые – замкнутые (в них не поступает и из них не выделяется вещество, происходит лишь обмен энергией) и открытые – незамкнутые (постоянно происходят ввод и вывод не только энергии, но и вещества).

Под понятием самоорганизация понимается процесс, в ходе которого создаётся, воспроизводится или совершенствуется организация сложной динамической системы. Процессы самоорганизации могут иметь место только в системах, обладающих высоким уровнем сложности и большим количеством элементов, связи между которыми имеют не жёсткий, а вероятностный характер. Субстанциональной основой самоорганизующихся систем выступает системообразующий фактор – стремление системы к максимальной устойчивости в конкретных условиях существования, что означает ее функционирование с минимальными затратами энергии. Максимальная устойчивость является конечной целью существования и развития системы, на языке математики и синергетики – ее аттрактором. Этому главенствующему принципу подчиняются все законы функционирования, развития и организации системы: дифференциация, интеграция и иерархизация элементов, автоколебательный режим, фазовые переходы, типы связей и этапы развития. Самоорганизующиеся системы способны при активном взаимодействии со средой изменять свою структуру, сохраняя в то же время свою целостность и действуя в рамках закономерностей, присущих окружению, выбирать одну из возможных линий поведения. Один из примеров самоорганизации в нелинейных системах – возникновение пространственного порядка из начального беспорядка и образование сложных пространственных структур в неоднородных протяжённых неравновесных системах, таких как Байкальская рифтовая система (БРС).

Системность БРС

При изучении системных процессов исследователи пытаются подтянуть геологию до уровня точных наук, но это удается пока только в отношении вещественных геологических дисциплин – кристаллографии, минералогии, геохимии, петрологии, геофизики. Затем в иерархическом ряду объектов и наук уровень познания снижается вплоть до уровня 10% истинности (геоистория, тектоника) [7]. Причина этого не только в недостатке информации при ретроспективном анализе, но и в необычайной сложности, многоплановости, специфичности геологических объектов и процессов. Законы точных наук в одежде геологической специфики теряют свою детерминационную природу и ведут к неоднозначным результатам. Здесь одинаковые геологические объекты, например, могут иметь полигенетическое происхождение [2]. В результате детерминизм закона растворяется в неповторимости явлений и вырождается в эмпирическое обобщение, трактуемое и интерпретируемое различным образом разными группами исследователей. Это в полной мере относится к истории образования и геодинамике БРС [3 и ссылки в ней].

Понятие Байкальская рифтовая система возникло, очевидно, под влиянием термина мировая система рифтов, характеризующего систему океанических и континентальных рифтов, имеющих общую протяженность около 70 000 км. Такие размеры придают этим структурам глобальное значение и заставляют связывать их с какими-то общими закономерностями развития литосферы рифтовых структур и земного шара. Рифтовая система, в том числе и Байкальская, в геологическом смысле воспринимается, прежде всего, как естественная, природная система рифтовых впадин, которая может быть классифицирована по субстрату как рифтогенная, основанная на процессах рифтогенеза. БРС протягивается системой разноориентированных рифтовых впадин и обрамляющих их структур из северо-западной Монголии вдоль оз. Байкал к южной Якутии на расстояние почти 2200 км и занимает Саяно-Байкальское поднятие, являющееся самой возвышенной частью

восточносибирских и северомонгольских нагорий и поднимающееся на флангах до 3000-3500 метров над уровнем моря [3]. Расположение кайнозойских рифтогенных структур обусловлено сложной геологической историей развития региона, контрастным различием в термомеханических свойствах прилегающих территорий и ослабленной литосферой в месте развития рифта. В настоящее время доминирует представление о суперпозиции внешних и внутренних геодинамических сил при формировании и эволюции БРС, что свидетельствует об открытости системы. БРС сформирована как изолированная система, не связанная пространственно с другими континентальными или океаническими рифтами, и имеет слабый вулканизм и высокую сейсмическую активность.

БРС характеризуется определенным единством, целостностью и индивидуальностью: она выделена из окружающей среды и отличается от нее как геолого-геофизический мантийно-коровый объект, имеющий границы и присущие ему свойства, которые дают возможность детерминировать границу между системой и средой. Так как БРС имеет зонно-блоковую структуру литосферы, продольная и поперечная дискретность которой формируется зонами глубинных разломов, секущими и уходящими за пределы БРС, можно полагать, что между системой и окружающей средой, а также между элементами системы имеются горизонтальные и вертикальные каналы связи. Наличие астеносферного диапира, вызвавшего растяжение коры и образование БРС, свидетельствует о вертикальных каналах связи и определяет природу системообразующего фактора – движущей силой внутриплитного рифтогенеза в Восточной Сибири является поднятие и боковое растекание материала астеносферы, вызванное тепловой и гравитационной неустойчивостью литосферы и мантии. Этот системообразующий фактор выражает смысл системы, который обычно называют эмерджентным свойством системы, т.е. свойством, которым обладает система, но не обладают какие-либо ее части сами по себе. Геодинамические процессы, пространственная структура и реологические свойства БРС формируют соотношения между элементами и

эволюцию системы. В.П. Солоненко выделяет с сейсмогеологической точки зрения среди впадин байкальского типа следующий иерархический ряд: зарождающиеся – эмбриональные – зрелые – отмирающие. При этом он подчеркивает [6, с. 66], что развитие зарождающихся и эмбриональных впадин знаменует качественно новый этап в эволюции Байкальской рифтовой системы. Элементы и структура БРС вторичны по отношению к системообразующему фактору, который определяет, что является элементами системы, каково их структурное взаимоотношение и какова их дальнейшая судьба.

Таким образом, по ряду признаков, характеристик и определений БРС следует классифицировать как самоорганизующуюся открытую нелинейную динамическую систему, иерархически развивающуюся на рифтогенном субстрате в стохастическом процессе горизонтальных и вертикальных связей. В настоящее время определен системообразующий фактор, выделены границы и структурная иерархия главных элементов системы, рассмотрены основные этапы ее геологической эволюции. Однако некоторые параметры и характеристики БРС как системы до сих пор остаются слабо изученными и понятыми. К ним относятся и системообразующие, т.е. обеспечивающие обособленное функционирование и развитие системы: по отношению к управлению и цели, по степени связности и видоизменяемости и некоторые другие. В работе [5] приведена классификация типов систем по числу элементов и характеру их связей, согласно которой простые системы включают порядка 10³, большие саморегулирующиеся – до 10⁶, саморазвивающиеся – 10¹⁰-10¹⁴ элементов. На основании этой классификации для простой характеристики геолого-геофизической системы можно использовать сейсмичность: при отсутствии или слабой сейсмической активности геосистема линейна, увеличение активности указывает на рост нелинейности системы, а высокий уровень сейсмической активности БРС отражает ее повышенную нелинейность.

Отражение нелинейной геодинамики БРС в данных GPS

При изучении параметров сейсмических источников в литосфере БРС выделены три пространственные структуры-аттракторы рифтогенеза (САР), расположенные в районе Южно-Байкальской, Хубсугульской и Муйской впадин [10]. Временные аттракторы рифтогенеза БРС отражают структуру «сборки» в рамках сценария эволюции с бифуркациями трехкратного равновесия [9]. В соответствие с теорией диссипативных динамических систем аттракторы и серии бифуркаций определяют ключевые особенности и свойства кайнозойской геодинамики БРС – нелинейность, неоднородность и неустойчивость. В литосфере БРС напряжения формируются пространственно-временной суперпозицией глобального квазистационарного поля напряжений сжатия литосферы Земли и переменных воздействий трех САР, в каждой из которых с периодичностью около 10 лет происходят регионально-синхронизированные циклические импульсные процессы расширения и медленные релаксирующие процессы возвращения в состояние рифтогенеза. Особенности импульсного нелинейного поведения САР находят отражение в пространственно-временных изменениях сейсмичности и напряженно-деформированного состояния среды [9, 10 и ссылки в них]. Импульсное расширение САР и рост горизонтальных напряжений приводит к кратковременному повышению относительного числа толчков-сдвигов и взбросов. Эпизоды синхронизации годовых чисел землетрясений свидетельствуют, что происходящие при бифуркациях деформации среды отражаются на огромной территории Монголо-Байкальского региона. Особенности сейсмотектонического течения геологического материала отражают закономерности неоднородного нелинейного объемного деформирования литосферы БРС и обусловлены перераспределением напряжений и деформаций внутри литосферы региона между тремя САР, когда области сжатия чередуются с областями растяжения. В упругом приближении Гука векторы напряжения и деформации коллинеарны, и инверсии вектора напряжений при бифуркациях обусловят соответствующие трансформации

вектора деформации. Ниже представлены результаты статистической переработки данных GPS (Global Positioning System) геодезии, которые интерпретируются как эффекты нелинейной геодинамики БРС.

В последнее время при изучении геодинамики регионов широко используются данные GPS геодезии, позволяющие определить относительные скорости устойчивого движения жестких блоков литосферы. Обычный подход к изучению динамики процесса деформирования по данным о скоростях годовых перемещений пунктов GPS невозможен, так как исходные материалы у нас отсутствуют. Используемые нами данные GPS взяты из двух основных публикаций коллектива авторов [4, 8], последовательно расширяющего пространственно-временной интервал измерений на GPS-пунктах сети Байкало-Монгольского геодинамического полигона (БМГП). В работе [8] представлены результаты расчетов векторов горизонтальных скоростей пунктов GPS за 1994-2002 гг., а в работе [4] – материалы обработки GPS измерений за период с 1994 по 2007 годы. Современные методы спутниковой геодезии дают возможность определять направления и скорости пунктов GPS и на основании этих данных характеризовать устойчивое движение тектонических структур. Этой цели подчинены приведенные в [4, 8] результаты, которые характеризуют средний за анализируемый период времени вектор относительной горизонтальной скорости каждого пункта GPS. Такое осредненное представление результатов затрудняет анализ изменений во времени скорости перемещений пунктов GPS, который необходим для выявления особенностей их движения в условиях импульсной нелинейной геодинамики БРС. Следует также отметить, что для оценки средних скоростей перемещений GPS-пунктов БМГП используются методы обработки стационарных процессов, что затрудняет выделение импульсного сигнала или затухающего во времени колебательного процесса, свойственного описанной выше геодинамике БРС. Чтобы проиллюстрировать изменение особенностей колебательного или импульсного поведения, 9 колебательных и импульсных сигналов были оценены методами обработки стационарных процессов в условиях, имитирующих возможные перемещения пунктов GPS при различных

типах геодинамики. К каждому сигналу были применены методы обработки стационарных процессов, а полученный в результате типичный «средний» график (кривая 2) представлен на рисунке 1 для суперпозиции стационарного сигнала с амплитудой 0.5, набора импульсов амплитудой 0.3 в 0, 10, 20...70 отсчет и случайной помехи с амплитудой от 0 до 0.05 (кривая 1). Видно, что результирующий средний сигнал быстро уменьшается и не превышает одного стандартного отклонения, задаваемого величиной импульсного сигнала. Таким образом, в результате примененной обработки суперпозиция стационарного и импульсного сигналов приобретает со временем вид квазистационарного процесса. Из рисунка 1 следует, что осредненные за какой-то период времени амплитуды горизонтальных скоростей пунктов GPS не позволят выявить колебательный или импульсный вид естественных процессов. Однако для имитированных сигналов «скачки» импульсов превышают стандарт и, очевидно, могут быть выделены по материалам GPS при ориентированном на это анализе. Так, например, по данным GPS в 1997 году пос. Листвянка, расположенный на западном берегу оз. Байкал, приподнялся относительно расположенного в платформенной части города Иркутска на 1-2 см [1]. Мы полагаем [10], что этот подъем обусловлен объемным расширением Южно-Байкальской САР.

Рис. 1. Иллюстрация применения методов обработки стационарных процессов

1 — исходная суперпозиция стационарного сигнала с амплитудой 0.5 и набора импульсов амплитудой 0.3 в 0, 10, 20...70 отсчет, осложненная помехой; 2 — результирующий сигнал принимает квазистационарный вид с ростом числа отсчетов.

Эффекты нелинейной геодинамики БРС нашли отражение в азимутах перемещений GPS-пунктов. На рисунке 2 представлена гистограмма (ряд 1) разностей азимутов перемещений 36 общих пунктов GPS за 1994-2002 гг. и за 1994-2007 гг., вычисленных по материалам из [4, 8]. Видно, что максимум формируется в диапазоне от -60° до 30° и имеется смещение данных в область отрицательных значений.

Рис. 2. Гистограммы разностей азимутов перемещений пунктов GPS по данным за 1994-2002 гг. и за 1994-2007 гг.

1 – для 36 общих пунктов, 2 – удалены 9 указанных в тексте пунктов с максимальными разностями азимутов.

Максимальными отличиями азимутов характеризуются пункты HARA (-227°) и LIST(-163°), что указывает на смену направления смещений этих пунктов на обратное, т.е. на инверсию вектора деформаций. В пунктах KULT, MOND и ANGA модули разности азимутов составляют примерно 83° , 81° и 80° соответственно, в пункте TURK $\sim 70^\circ$, в пункте NSEL $\sim 60^\circ$, в пунктах SLYU и ORLK $\sim 54^\circ$ и 50° соответственно. Все указанные пункты находятся в южной части БРС и окружают САР с разных сторон. Если удалить эти пункты из анализа, то гистограмма разности азимутов принимает вид нормального распределения (рис. 2, ряд 2).

Заключение

Таким образом, БРС является самоорганизующейся открытой нелинейной динамической системой, иерархически развивающейся на рифтогенном субстрате в стохастическом процессе горизонтальных и вертикальных связей. Будучи целеполагающей, эта система способна активно и целенаправленно осуществлять собственное развитие, собственное воспроизводство и собственное усложнение. Отсюда следует, что каждый из всего множества больших и малых процессов в литосфере БРС несет в себе в качестве своего сущностного ядра момент целевой предназначенности. Этот факт служит той системой отсчета, которая позволяет теоретической геологии и геофизике увидеть всю геолого-геофизическую историю, данность и перспективу.

Список литературы

1. Гольдин С.В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли. – 2004. – № 10. – С. 37–54.
2. Летников Ф.А. Синергетика геологических систем. – Новосибирск: Наука, 1992. – 230 с.
3. Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика. – 2003. – Т.44. – №5. – С. 91–106.
4. Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Кале Э. Вращения и деформации земной поверхности в Байкало-Монгольском регионе по данным GPS-измерений // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. – №7. – С. 1006–1017.
5. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981. – 186 с.
6. Солоненко В.П. Сейсмотектоника и современное структурное развитие Байкальской рифтовой зоны / Байкальский рифт. – М.: Наука, 1968. – С. 57–71.
7. Философия современного естествознания [Под ред. С.А. Лебедева]. М.: ФАИР-ПРЕСС, 2004. – 304 с.
8. Calais E., Vergnolle M., San'kov V., Lukhnev A., Miroshnitchenko A., Amarjargal S., Deverche're J. GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994–2002): implication for current kinematics of Asia // Journal of geophysical research. – 2003. – V. 108(B10). – P. 2501.
9. Klyuchevskii A.V. Nonlinear geodynamics of the Baikal Rift System: an evolution scenario with triple equilibrium bifurcation // Journal of Geodynamics. – 2010. – V. 49 (1). – P. 19–23.
10. Klyuchevskii A.V. Rifting Attractor Structures in the Baikal Rift System: Location and Effects // Journal of Asian Earth Sciences. – 2014. – V. 88. – P. 246–256.