PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2014 VOLUME 5 ISSUE 2 PAGES 527-546

http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0139



ISSN 2078-502X

GEODYNAMIC ACTIVITY OF THE LITHOSPHERE AND PROBLEMS OF TECTONOPHYSICS – OUTLOOK AFTER 35 YEARS

K. G. Levi

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: Reviewed are aspects of modern geodynamics and methods of mapping of geodynamic processes which have been developed since 1960s in the Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS (specifically since 1980s by the Laboratory of Tectonophysics and now jointly with the Laboratory of Recent Geodynamics). Achievements and prospects of the studies are discussed. The publication is devoted to the 35th anniversary of the Laboratory of Tectonophysics and its main achievements in geodynamics.

Key words: geodynamics, tectonophysics, statistical analysis, seismicity, faulting, lithosphere, crust, forecasting, earthquake prediction.

Recommended by E.V. Sklyarov

Citation: *Levi K.G.* 2014. Geodynamic activity of the lithosphere and problems of tectonophysics – outlook after 35 years. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (2), 527–546. doi:10.5800/GT-2014-5-2-0139.

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЛИТОСФЕРЫ И НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕКТОНОФИЗИКИ – ВЗГЛЯД ЧЕРЕЗ 35 ЛЕТ

К. Г. Леви

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация: Рассматриваются некоторые аспекты современной геодинамики, картографирования геодинамических процессов, развивавшиеся с середины 60-х годов прошлого века в ИЗК СО РАН (с начала 80-х гг. в лаборатории тектонофизики, а затем и совместно с лабораторией современной геодинамики). Рассмотрена история вопроса, достигнутые результаты развития идей и перспективы дальнейших исследований в этой области. Статья посвящается 35-летию лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН и ее достижениям, главным образом, в области геодинамики.

Ключевые слова: геодинамика, тектонофизика, статистический анализ, сейсмичность, разломообразование, литосфера, земная кора, прогноз, предсказание землетрясений.

«... Не следует множить сущее без необходимости ...» У. Оккам (1285–1349 гг.)

«... В любой науке столько истины, сколько в ней математики ...» И. Кант (1724–1804 гг.)

1. Введение

В этом году исполняется 35лет лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН, поэтому в статье будут освещены некоторые достижения в области новейшей и современной геодинамики. Надо отметить, что ядро лаборатории начало формироваться в середине 70-х годов прошлого века внутри лаборатории неотектоники и геоморфологии ИЗК, которой в те годы руководил академик Н.А. Логачев. В самостоятельное подразделение она оформилась в 1979 г. и стала быстро расширяться за счет молодых аспирантов. В 1993 г. из нее выделился новый коллектив кабинета современной геодинамики, который в 1998 г. был преобразован в лабораторию современной геодинамики. В настоящее время лаборатория тектонофизики и лаборатория современной геодинамики продолжают тесно сотрудничать. В связи с этим имеет смысл проиллюстрировать развитие геодинамических исследований, выполнявшихся в разные годы совместно обеими лабораториями.

Мы не случайно в начало статьи поместили в виде эпиграфов слова Уильяма Оккама и Иммануила Канта, которые не утратили своей значимости и по сей день. Рассмотрим в рамках этих философских высказываний вопрос, вынесенный в заголовок. Действительно, в естественноисторических и гуманитарных науках, описательных по существу, эти принципы часто нарушаются, причем так, что превращают достоверные факты в знание типа «Science fiction». Именно статистические методы, которые стали проникать в геологию (фундаментальную и прикладную) в конце 40-х годов, а особенно в 60-х годах прошлого века, позволили ограничить «полет фантазий» и сделали эту науку строже в своих выводах.

Первые шаги по пути «математизации» геологических знаний были сделаны лишь в 50–60-х годах прошлого века [*Gzovsky*, 1959, 1975; *Belousov*, *Gzovsky*, 1964]. Сначала статистический анализ проник в структурную геологию, а затем и в структурную геоморфологию [*Devdariani*, 1967; *Filosofov*, 1975; *Levi*, 1995]. Решались задачи, связанные с геометрией геологической среды. Одновременно исследователи пошли по пути анализа временных рядов [*Devdariani*, 1974], что позволило решать задачи периодичности геологических процессов. Результаты фундаментальных исследований в области разломной тектоники в ИЗК СО АН СССР были опубликованы [*Sherman*, 1977] и стали отправным моментом для целого ряда исследований в области новейшей и современной геодинамики. В этой монографии были изложены основные физические закономерности развития разломов в земной коре, иерархические свойства во взаимодействии разломов, выяснены реологические свойства геологической среды и связь сейсмичности с развитием разломов. Все статистические исследования в этой области тормозились лишь тем, что из описательных образов геологических объектов необходимо было извлечь такие числовые характеристики или создать такие числовые параметры, которые объективно отражали бы те или иные свойства этих объектов.

2. ГЕОДИНАМИКА И ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЛИТОСФЕРЫ

Поскольку лаборатория тектонофизики формировалась еще до момента ее официального появления в 1979 г., в ней одновременно сложилось два относительно самостоятельных направления – тектонофизика и экспериментальная геотектоника; новейшая геодинамика. Именно это и отражается в ее современной структуре. В конце 70-х годов С.И. Шерман и К.Г. Леви активно участвовали в обсуждении идей тогда еще «новой глобальной тектоники» применительно к анализу новейшей тектоники Байкальской рифтовой зоны. С.И. Шерманом и автором была выдвинута гипотеза о существовании в этом регионе трансформных разломов, обеспечивших раскрытие Байкальской впадины (рис. 1). Первая публикация по этой теме была опубликована в 1978 г. [Sherman, Levi, 1978], а подробно история развития этих идей изложена в работе [Levi et al., 2012]. Впоследствии велись морские геофизические исследования на акватории оз. Байкал и структурно-геологическая съемка активных разломов на его берегах. Надо отметить, что активные разломы в днище озерной ванны были неизвестны, а представления о его неотектонической структуре строились на основе государственной геологической съемки. Комплекс международных геолого-геофизических исследований в рамках проектов Байкальского международного центра экологических исследований СО РАН позволил в конечном итоге составить карту активных разломов Байкальской впадины (рис. 2) [Levi et al., 1997].

В свете развивавшихся в эти годы плитотектонических концепций «раскрытия» Байкальской впадины К.Г. Леви с соавторами [Levi et al., 1993] высказывали мысль о том, что если подлитосферные процессы, способствующие раскрытию рифта кардинально не изменятся, а северо-восточный трансформный разлом про-



Рис. 1. Внутренняя структура зарождающейся на континентальной литосфере Муйско-Чарской трансформной межплитной границы (северо-восточный фланг Байкальской рифтовой зоны).

1 – активные разломы: А – сбросо-сдвиги, Б – сбросы; 2 – суходольные рифтогенные впадины; 3 – озерные рифтогенные впадины; 4 – трансформная межплитная граница; 5 – направление перемещения вдоль трансформной границы [Sherman, Levi, 1978].

Fig. 1. The internal structure of the Muya-Chara transform inter-plate boundary developing in the continental lithosphere (NE flank of the Baikal rift zone).

1 – active faults: A – shear faults with normal component, **B** – normal faults; 2 – upland riftogenic basins; 3 – lacustrine riftogenic basins; 4 – transform inter-plate boundary; 5 – direction of displacement along the transform boundary [*Sherman, Levi, 1978*].

должит свое развитие, то со временем, в геологическом его понимании, Байкальская рифтовая впадина превратится в океанский бассейн и в него хлынут воды Охотского моря. Эта идея вызвала большой интерес и обсуждалась в журнале «Наука в России».

В начале 80-х годов прошлого века исследования в области новейшей и современной геодинамики расширились как по тематике, так и по числу исследователей, все больше склонявшихся к статистическому анализу геологических процессов и структур [Sherman, Lobatskaya, 1981; Levi, 1981]. Стало очевидным, что дальнейшие исследования в этой области практически невозможны без применения системного анализа и учета иерархии структурных элементов земной коры, а также особенностей их временных соотношений [Levi, 1985]. Важным в этом смысле являлось то, что при переходе с одного иерархического уровня на другой приходилось конструировать новые параметры с учетом эмерджентности или подменять их заведомо эмерджентными характеристиками.

Совокупность всего сказанного выше, наличие различных статистических закономерностей в развитии геологических структур и процессов обусловили необходимость картографирования геодинамической активности литосферы на основе нескольких характеристик (табл. 1, рис. 3). Таблица 1, по существу, является пояснительной частью к карте рис. 3.

Тогда, в конце 80-х годов, это можно было сделать лишь на полуколичественной основе, хотя между шестью главными параметрами уже тогда были установлены парные корреляционные зависимости. Интегральный показатель геодинамической активности литосферы был выражен в относительных единицах – баллах, неплохо отражавших общее состояние литосферы на юге Восточной Сибири. Покажем глубинную сущность взаимодействия между процессами, определяющими взаимоотношения между некоторыми параметрами.

3. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗЛОМНОЙ ТЕКТОНИКИ И СЕЙСМИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

На рис. 4 приведена фундаментальная зависимость между заданными природой длинами разломов **L, km**, и расстояниями между ними **M, km** [*Sherman*, 1977]. Из анализа кривых следует, что чем короче разрывные элементы земной коры, тем ближе они располагаются



Рис. 2. Карта активных разломов Байкальской впадины, построенная по материалам непрерывного сейсмического профилирования на озере Байкал и структурно-геологических исследований на его берегах [*Levi et al.*, 1997].

Fig. 2. Map of active faults of the Baikal basin which is based on data from continuous seismic profiling of Lake Baikal and structural geological studies of its shores [*Levi et al.*, 1997].

Интегральный пока- затель геодинами- ческой активности литосферы	Амплитуды верти- кальных неотекто- нических движений, м	Амплитуды гори- зонтальных неотек- тонических движе- ний, м	Сейсмический потенциал (М _{тах} землетрясений)	Площадь распростра- нения кайнозойских магматических обра- зований, %	Плотность теплового потока, мВт/м ²	Мощность литосферы, км
1 — очень низкая	≤ 250	10 ⁰	?	-	≤ 30	≥ 200
2 – низкая	250-500	10 ¹	?	-	30–50	200-150
3 — средняя	500-1000	10 ²	≤ 4	≤ 1 (редкие вулканы)	50–70	150-100
4 — высокая	1000-2000	10 ³	4–6	1–10	70–90	100-70
5 — очень высокая	≥ 2000	10^{4}	≥ 6	≥ 10	≥ 90	≤ 70* или 150**

Таблица 1. Главные геолого-геофизические показатели геодинамической активности литосферы

	Table	1. Main geological a	nd geophysical indicators	of geodynamic activit	y of the lithosphe
--	-------	----------------------	---------------------------	-----------------------	--------------------

П р и м е ч а н и е. Прочерки – отсутствие данных; ? – данные неизвестны; * – как правило, при нормальном развитии литосферы; ** – при сдвоении литосферы в зонах континентальной коллизии.

N ot e s. Dash – no data; ? – unknown; * – typically, in case of normal development of the lithosphere; ** – in case of lithosphere reduplication in zones of continental collision.





1 – области с различной геодинамической активностью литосферы (сверху вниз соответственно таблице 2 – 1, 2, 3, 4, 5); 2 – зоны, в которых зарегистрированы землетрясения с магнитудой М: а – ≤ 4; б – 4–6; в – ≥ 6; 3 – границы областей с разной степенью активности литосферы; 4 – границы литосферных блоков: слабоактивные (а) и высокоактивные (б); 5 – изолинии плотности теплового потока, мВт/м²; 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.

Fig. 3. Map of geodynamic activity of the lithosphere in Siberia [Logatchev et al., 1986, 1987a, 19876, 19876].

1 – regions differing in degrees of geodynamic activity of the lithosphere (top to bottom as per Table 2 – 1, 2, 3, 4, 5); 2 – zones wherein earthquakes were registered: $a - M \le 4$, 6 - M from 4 to 6, $B - M \ge 6$; 3 – boundaries of regions differing in degrees of geodynamic activity of the lithosphere; 4 – boundaries of lithospheric blocks: a - low activity, 6 - high activity; 5 – heat flow density isolines in mW/m²; 6 – Cenozoic magmatism areas; 7 – geological age of the crust; 8 – boundaries of crustal segments differing in age; 9 – hypothetic direction of relative horizontal movement of lithospheric blocks.



Рис. 4. Изменение расстояния между разломами M, km, в зависимости от их длины L, km [Sherman, 1977].

Эти кривые отражают не только закономерности формирования разломных структур в земной коре, но и реологию среды, в которой разломы формируются.

Fig. 4. Distance between faults, M (km) versus fault length, L (km) [Sherman, 1977].

The curves show regularities of faulting in the crust and also the rheology of the geological medium wherein the faults occur.

друг к другу, тем самым понижая квазивязкость деформируемой среды, вмещающей разломы. Впоследствии эта зависимость стала прародительницей целого комплекса зависимостей, характеризующих особенности разломной тектоники и роль последней в эволюции литосферы.

Рис. 5 поясняет тезис о роли разломов в формировании реологических свойств литосферы. Кривая показывает, что по мере уменьшения квазивязкости литосферы *lg* **η** число разрывов **N** в элементарной ячейке возрастает по нелинейному закону. При этом выделяются два комплекса геологических объектов: с повышенной и пониженной квазивязкостью (табл. 2). Последние присущи тектонически подвижным поясам, в которых активно развиваются сейсмический и вулканический процессы. Сами по себе разломы являются проводящими структурными элементами литосферы, отводящими избыточное глубинное тепло из недр. Но



Рис. 5. Изменение плотности активных разломов **N** в континентальной литосфере в зависимости от ее квазивязкости *lg η.* [*Levi*, 1991].

Очевидно, что высокая плотность разломов понижает значения квазивязкости среды, а уменьшение плотности ведет к повышению квазивязкости. Разрыв в поле точек говорит о том, что переход между подвижными тектоническими поясами и кратонами происходит резко, а не плавно, как этого, может быть, хотелось.

Fig. 5. Density of active faults, N in the continental lithosphere versus its quasi viscosity ($\lg \eta$) [*Levi*, 1991].

It is evident that a higher density of faults results in a lower quasi viscosity of the medium and vice versa. A gap in the data field shows that the transition between mobile tectonic belts and cratons takes place abruptly, rather than gradually as it might seem reasonable.

Параметр	Неотектонические комплексы	еские комплексы				
	Подвижные пояса	Кратонические области				
N grad V η	30–50 1.0–3.0·10 ⁻¹⁰ /год 10 ¹⁸ –10 ²⁰	≤ 10 $\leq 0.5 \cdot 10^{-10}$ /год $\geq 10^{22} - 10^{24}$				

Таблица 2. Соотношение параметров N, grad V и η с учетом разброса данных

Параметр	Неотектонические комплексы						
	Подвижные пояса	Кратонические области					
N grad V η	30–50 1.0–3.0·10 ⁻¹⁰ /год 10 ¹⁸ –10 ²⁰	≤ 10 $\leq 0.5 \cdot 10^{-10}$ /год $\geq 10^{22} - 10^{24}$					

T a b l e 2. Ratios between parameters N, |grad V| and η with regard to the data scatter



Рис. 6. Зависимость угла наклона графиков повторяемости землетрясений заданных классов у от плотности теплового потока **q, mW/m²**.

Кривая иллюстрирует изменение реологических свойств сейсмоактивной среды под действием глубинного тепла.

Fig. 6. Inclination angles of curves showing recurrence of earthquakes of the given categories (γ) versus heat flow density, q (mW/m²).

The curve illustrates changes of rheologial properties of the seismically active medium under the impact of deep heat.

появляется вопрос о том, как объяснить возникновение сильных землетрясений в подобных условиях. Посмотрим, как меняется наклон графиков повторяемости землетрясений у на территориях с различными значениями плотности глубинного теплового потока **д**, mW/m^2 (рис. 6). Из рис. 6 следует, что величина у отражает реологические свойства сейсмоактивной среды. В объемах литосферы с повышенной квазивязкостью возникает большое количество слабых землетрясений, а мощные – крайне редки. В областях же с пониженной квазивязкостью чаще возникают мощные землетрясения.

Анализ повторяемости землетрясений, вулканических извержений и возникновения цунами (рис. 7), с одной стороны, отражает реологические свойства среды, в которой они проявляются, а с другой – поясняет причины несовпадения по времени активизаций упомянутых явлений. Если для возникновения землетрясений необходимо наличие высокотрещиноватой среды, при деформации которой прорастают большие разломы, порождающие сильные землетрясения, то для извержений вулканов необходимы другие условия. Вулканизм предпочитает условия хорошо термостатированных недр, что способствует формированию магматических очагов, а разломы в это время играют отрицательную роль, отводя к поверхности избыточное тепло недр. Цунами же в водной среде вообще возникают редко, поскольку генерируются мощными подводными землетрясениями М≥7 с глубинами гипоцентров до 30-60 км, вулканическими извержениями, крупными обвалами, оползнями и супертайфунами.

В процессе изучения неотектонических движений в сейсмоактивных зонах литосферы [Levi, Lysak, 1986; Levi, 1991; Levi, Sherman, 1995] были установлены тесные связи между толщиной «сейсмической» литосферы L(q), км, и плотностью теплового потока q, mW/m^2 (рис. 8), оценены пространственные вариации показателя |grad V|·10⁻¹⁰/год⁻¹, относительного показателя скорости неотектонических деформаций (рис. 9) [Gzovsky et al., 1959] и плотности активных разломов N (рис. 10), рассчитанной по методике [Sherman, 1977]. Из сравнения перечисленных рисунков следует, что пояса высокоразогретой и тонкой литосферы максимально подвержены интенсивному разломообразованию и тектоническим деформациям.

Вторая половина 70-х – первая половина 80-х годов



Рис. 7. Изменение наклонов графиков повторяемости землетрясений, вулканических извержений и цунами в исторически обозримом прошлом.

Fig. 7. Changes of inclination of curves showing recurrence of earthquakes, volcanic eruptions and tsunami in the history.

прошлого века охарактеризовались стремлением исследователей к поиску статистических зависимостей между геометрическими параметрами геологических структур и сейсмическим процессом. К сожалению, эти поиски не увенчались успехами, и стало казаться, что такой путь не приведет к прогнозу землетрясений. В 1986 г. автору этих строк, вооруженному к тому времени основами системного анализа, пришла мысль о том, что сейсмологи изучают землетрясения как суть развития сейсмического процесса и их материалы характеризуют именно процесс в его параметрах, но не геометрию среды, в которой этот процесс развивается. Отсюда следовало, что для создания основ прогноза землетрясений необходимо выполнить геометризацию среды, порождающей землетрясения, и все встало на свои места. Новые зависимости стали более строгими и однозначными [Levi, 1987, 1988].

Высокая концентрация «коротких разломов» в литосфере и приуроченность к этим областям очагов сильных землетрясений показали, что сейсмоактивная среда структурирована и в ней следует выделять ряд соподчиненных структурных элементов (рис. 11), а на рис. 12 приведен пример сейсмических структур в зоне Беньофа под Курильским архипелагом. Анализ объемов «сейсмических» структур в связи с магнитудами землетрясений показал, что эти параметры связаны между собой нелинейно и что структуры больших объемов порождают наиболее сильные землетрясения (рис. 13). Вообще анализ сейсмических структур литосферы позволяет выполнить общее сейсмическое районирование не на традиционной основе, как это делается часто, а на базе статистических сопоставлений толщин упругой литосферы L_e, km, и сейсмоактивного слоя L_s, km, с максимально возможными магнитудами землетрясений M_{max}. Вариант подобной мелкомасштабной карты мы помещаем на рис. 14. Таким образом, углубленный анализ геодинамических обстановок с точки зрения количественного подхода дал весьма интересные результаты для картографирования геодинамической активности литосферы, но на более высоком уровне, чем тот, который был достигнут в 1986– 1988 гг.

Приведенные на рис. 4, 5, 6 и 13 количественные зависимости между параметрами разломной тектоники и сейсмичности вкупе с углубленным тектонофизическим анализом развития разломов в литосфере позволили, в конечном итоге, С.И. Шерману построить стационарную и нестационарную модели разломов [Sherman, 2012] (рис. 15).

Сами по себе эти модели подсказали ему, что сейсмические очаги располагаются в областях динамического влияния разломов [Sherman et al., 1983] – читай сейсмических структурах литосферы [Levi, 1987, 1988], а временной анализ возникновения инструментально зарегистрированных землетрясений позволил выйти на динамику их возникновения и, следовательно, временную последовательность активизации разломов в реальном времени. Странно, что параллель между областями динамического влияния разломов и сейсмическими структурами литосферы ни С.И. Шерман, ни К.Г. Леви не догадались провести еще тогда, в 80-х годах прошлого века.

В 80-х годах в рамках тектонофизических исследований под руководством С.И. Шермана В.А. Санько-



Рис. 8. Вариации толщины континентальной литосферы L(q), рассчитанные как функция теплового потока q, mW/m².
Fig. 8. Variations of continental lithosphere thickness, L(q) calculated as the function of heat flow (mW/m²).







Рис. 10. Пространственные вариации плотности активных разломов N.

Fig. 10. Spatial variations of density of active faults, N.



Рис. 11. Иерархическая соподчиненность сейсмических структур литосферы [Levi, 1988].

Fig. 11. The hierarchy of seismic structures of the lithosphere [Levi, 1988].



Рис. 12. Пример сейсмических структур в зоне Беньофа в р-не Курильской островной дуги.

Слева – график изменения скорости прохождения сейсмических волн с глубиной. Справа – обобщенный разрез литосферы и верхней мантии. Слои сверху вниз: земная кора (континентальная слева и океанская справа); литосферная мантия; астеносфера и верхняя мантия. Видно, что сейсмические структуры успешно развиваются как в континентальной, так и в океанской литосфере и связаны с их деформациями в зоне поддвига. Сейсмоактивный объем на глубинах 300–500 км, вероятно, обусловлен спонтанным переходом минеральных ассоциаций верхней мантии в более устойчивое состояние при свойственных этим глубинам условиях давлений и температур.

Fig. 12. Seismic structures in the Benioff zone near the Kuril island arc.

Left – seismic wave velocity versus depth. Right – a general profile of the lithosphere and the upper mantle. Layers (top to bottom): crust (left – continental, right – oceanic), lithospheric mantle, astenosphere and upper mantle. Seismic structures are well developed both in the continental and oceanic lithosphere and associated with lithosphere deformation in the subsidence zone. The seismically active volume at depths from 300 to 500 km may be caused by spontaneous transition of mineral associations of the upper mantle to a more stable state under specific pressure and temperature conditions at such depths.



М

Рис. 13. Зависимость магнитуды **M** от объема очага **V, км³,** для Байкальского региона.

Fig. 13. Magnitude, M versus focus volume, V (km³) for the Baikal region.

Рис. 14. Пример нетрадиционного общего сейсмического районирования территории Северной Евразии на базе согласования параметров L_s/L_e и M_{max}.

Fig. 14. An example of unconventional general seismic zonation of the territory of Northern Eurasia on the basis of correlations between parameters L_s/L_e and M_{max} .

вым с учетом условий подобия была проведена серия модельных экспериментов по оценке глубины проникновения разломов и выполнен тектонофизический анализ условий возникновения и развития Ангараканского роя землетрясений в районе Северо-Муйского тоннеля БАМ [San'kov et al., 1991]. В те же годы К.Г. Леви, исследуя разломно-блоковые структуры в континентальной литосфере, показал, что конфигурация и среднегеометрические размеры блоков зависят от толщины слоя, в котором они заложены, и существенно различаются в кратонных областях и подвижных поясах (рис. 16). Блоковые структуры кратонических областей всегда более изометричные, а в подвижных областях – узкие и протяженные и описываются нелинейными уравнениями.

Все показанное выше позволяет сделать некое генеральное тектонофизическое заключение о том, что источником сильных колебаний поверхности является тектоническое дробление сейсмоактивной среды в неких объемах и прорастание в ней протяженных разломов. Сами очаги землетрясений образуют относительно изолированные объекты с высокой плотностью трещиноватости, которые можно в мегамасштабе представить в виде своеобразных «сит», пропускающих через себя мантийные флюиды и гидротермы. Оба глубинных потока осаждают на стенках трещин полезные компоненты, способствуя формированию месторождений типа штокверков (рис. 17). Сравнение рисунка 17 с рис. 12, 13 подсказывает нам, что детальное изучение месторождений таких типов может лечь в основу восстановления сейсмических условий в подвижных поясах далекого геологического прошлого. В свою очередь размеры объектов позволяют оценить энергетику сейсмических событий, а те, соответственно, – глубину возникновения сейсмических очагов и одновременно величину денудационного среза,



Рис. 15. Стационарная (*a*) и нестационарная (б) модели разломов.

На стационарной модели отражен вертикальный реологический разрез литосферы, на котором глубины горизонтальных границ между формами локальных структурных образований изменяются в зависимости от типа напряженного состояния литосферы. На нестационарной, изменяющейся во времени модели разломов показаны очаги землетрясений, разновременно зарождающиеся в различных по сечению и простиранию местах разрыва, отражающие временные вариации различных физических полей околоразломной среды [Sherman, 2012].

Fig. 15. Stationary (*a*) and non-stationary (*b*) models of faults.

In the stationary model, the vertical rheological profile of the lithosphere is shown; depths of horizontal boundaries between the local structures vary with regard to types of the state of stresses of the lithosphere. The non-stationary (changeable with time) model shows earthquake foci that occur at different moments of time on sites of different cross-sections and strike along the fault, which reflect temporary variations of various physical fields in the near-fault medium [*Sherman, 2012*].



Рис. 16. Зависимость среднегеометрических размеров тектонических блоков литосферы от толщины слоя, в котором они заложены: 1 – кратонические области, 2 – подвижные и сейсмоактивные пояса [*Levi*, 1991].

Fig. 16. Mean geometrical dimensions of tectonic blocks of the lithosphere versus thickness of layers wherein such blocks are formed: 1 – craton areas, 2 – mobile and seismically active belts [*Levi*, 1991].



Рис. 17. Схема штокверка [Structures..., 2014. http://znanie.podelise.ru/docs/91418/index-1736.html].

Fig. 17. The scheme of a stockwork [Structures..., 2014. http://znanie.podelise.ru/docs/91418/index-1736.html].

Сопоставление шкалы MSK-64 с длинами L _{ss} сейсмогенных разрывов												
Баллы MSK-64		$I_0 =$	56	7 8	9	10	11	12				
		$E_{\mathcal{A} \to \mathcal{C}} = 1$	10 ⁹ 10 ¹⁰	10¹¹ 10 ¹² -1	0 ¹³ 10 ¹⁴	10 ¹⁵ 1	10 ¹⁶	>10 ¹⁷				
<i>M_L</i> - Ч. Рихтера		$M_L = 3$	3-4 5	$M_L = 6$	$M_L = 7$	M	$I_L = 8$	$M_L = 9$				
Длина сейсмоген- ных разрывов L _{ss} , км		$L_{SS} = 0$).1 0.25	5 1.0	12.5	1	50	>400 ĸ	м			
	Сопоставление ши	сал инт	енсив	ности <i>VE</i> .	I и энер	огии	EVı	вулкан	ичес	ких из	вержений	İ
<i>VEI</i> – вулканичес- кий эксплозивный индекс <i>EV_{Дж} -</i> энергетический	VEI = ()		1	2	2	3	4 5	6	7	8	
	$E_{\mathcal{J}\mathcal{H}} = 10^3 - 10$	0 ¹⁰		10 ¹¹ - 10 ¹	³ 10 ¹⁴ -	10 ¹⁵	10 ¹⁶ 1	10 ¹⁷ 10 ¹⁸	10 ¹⁹	10 ²⁰	10^{21} - 10^{24}	> 10 ²⁴
	EV = 3-10)		11-13	14-	15	16	17 18	19	20	>21	
индекс вулканических извержений												

Рис. 18. Фрагмент сопоставления эмпирических и энергетических шкал [Zadonina et al., 2004].

Fig. 18. The empirical and energy scales in comparison [Zadonina et al., 2004].

поскольку эти объекты сегодня уже выведены на поверхность, то есть решить задачи палеореконструкций обстановок далекого геологического прошлого.

4. ТЕКТОНОФИЗИКА В КАРТОГРАФИИ И ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

За 20-летний период исследований в области «математизации» геологических знаний был накоплен обширный статистический материал о количественных взаимоотношениях между геолого-геофизическими параметрами, и стало возможным вновь вернуться к картографированию объектов геодинамической активности литосферы на новом уровне. При этом следовало отойти от представлений полуколичественного плана и перейти к оценке энергии различных геологогеофизических процессов. Такая попытка была предпринята в работе [*Zadonina et al., 2004*] (рис. 18), представляет лишь фрагмент разработанных тогда шкал,



Рис. 19. Карта современной геодинамики Азии.

Fig. 19. The recent geodynamics map of Asia.

которые не претерпели изменений к 2014 г.

К 2007 г. созрела мысль о создании карты современной геодинамики Азии, которая отразила бы на себе все новейшие наработки в количественной неотектонике и современной геодинамике [*Recent Geodynamics..., 2007; Levi et al., 2009*]. На карте нашли отражение напряженно-деформированное состояние литосферы континента, толщина континентальной литосферы, активные разломы, вулканизм, сейсмичность и скорости современных перемещений больших литосферных блоков по данным GPS-геодезических измерений (рис. 19).

Следом за Картой современной геодинамики Азии

вышла Карта неотектоники северо-восточного сектора Азии (рис. 20) [*Neotectonics map..., 2008*], составленная на принципиально новой основе. Для ее построения и отсчета амплитуд неотектонических движений был восстановлен рельеф земной поверхности, существовавшей до начала неотектонической активизации, учтен возраст начала проявления неотектонических движений, сконцентрированы сведения о разломно-блоковой структуре литосферы этого региона и ряд других новшеств, не применявшихся ранее.

Пока создавались Карта современной геодинамики Азии и Карта неотектоники северо-восточного сектора Азии, авторы данной статьи углубились в вопросы



Рис. 20. Карта неотектоники северо-восточного сектора Азии.

Fig. 20. The neotectonics map of the NE sector of Asia.

современной геодинамики: С.И. Шерман – в разработку количественных индексов сейсмической активности (учитывая положение гипоцентров землетрясений в зонах динамического влияния разломов) [Sherman, 2005, 2012; Sherman, Savitsky, 2006; Sherman, Gorbunova, 2008]; а К.Г. Леви – в оценку временных вариаций опасных природных процессов [Zadonina et al., 2007; Zadonina, Levi, 2008, , 2009; Levi et al., 2010; и др.]. Все эти исследования имели уже явный прогностический уклон. Справедливости ради отметим, что в этой области знания участвовали сотрудники ИЗК СО РАН, работавшие в разное время в лаборатории тектонофизики, – С.И. Шерман, В.В. Ружич, Е.А. Левина и К.Г. Леви, которых объединяла лишь идея прогноза землетрясений и прочих опасных явлений, но пути достижения цели были различными.

Так, В.В. Ружич и Е.А. Левина с середины 90-х годов прошлого века развивают идею изучения сейсмического режима [*Ruzhich*, 1997], базирующуюся на анализе размеров и длительности существования «сейсмических окон, или брешей». В большинстве случаев достоверность прогнозов по месту, энергии и времени ожидаемого сейсмического события оценивается авторами на уровне 70 % [*Ruzhich*, *Levina*, 2013]. Сегодня эти исследования вышли далеко за пределы Байкало-Монгольского сейсмического пояса.



Рис. 21. Вариации количественного индекса сейсмической активности (КИСА) разломов Байкальской рифтовой системы за последние 50 лет [*Sherman*, 2013].

На врезке значения КИСА, рассчитанные за 50-летний период.

Fig. 21. Variations of the quantitative index of seismic activity (QISA) of faults of the Baikal rift zone in the past 50 years [Sherman, 2013].

QISA values calculated for the past 50 years are shown in the insert.



Рис. 22. Совмещенные фрагменты прогнозных кривых, построенные с накоплением значений факторов F (F1 – вариации солнечной активности; F2 – вариации числа сейсмических событий; F3 – вариации сейсмического энергопотока; F4 – вариации числа вулканических извержений; F5 – вариации интенсивности экзогенных гравитационных процессов; F6 – изменение турбулентности атмосферы) [*Levi et al.*, 2012].

Fig. 22. Concurrent fragments of forecasted curves constructed with reference to accumulated values of factors F (variations of solar activity – F1, number of seismic events – F1, seismic energy flow – F3, number of volcanic eruptions – F4, intensity of exogenous gravity processes – F5, changes of atmosphere turbulence – F6) [*Levi et al., 2012*].

Среднесрочное прогностическое исследование С.И. Шермана базируется на моделях количественного индекса сейсмической активности (рис. 21) [Sherman, Gorbunova, 2008; Sherman et al., 2012].

Автор статьи в своих прогностических исследованиях опирается на анализ временных рядов различных природных опасностей, учитывая при этом те процессы, которые предшествуют «страховому» событию, сопровождают его или следуют за ним. Вариант такого поликомпонентного анализа приведен на рис. 22 [Levi et al., 2012].

Конечно же, прогностические исследования пока все еще остаются в начале пути. Это вызвано объективными причинами – недостатком необходимых данных и их несовершенством, относительной короткостью временных рядов наблюдений, схематическим описанием некоторых последствий проявления тех или иных процессов, особенно в исторических хрониках. Тем не менее эти поисковые исследования должны продолжаться, чтобы обеспечить появление положительных решений в будущем. Сегодня трудно уверенно обозначить, какой из прогностических путей наиболее рационален, но можно утверждать, что краткосрочного прогноза опасных явлений еще долгое время не будет. Однако такое утверждение не означает, что исследования в этом направлении следует приостановить. Они, во всяком случае, необходимы для расширения имеющихся знаний о развитии опасных процессов, а остальное нас ждет впереди.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, мы проследили временную эволюцию взглядов на современную геодинамику в ИЗК СО РАН. Перечислим, прежде всего, достигнутые результаты:

 внесен значительный вклад в изучение активной разломной тектоники Прибайкалья, Забайкалья и Монголии;

 установлены основные количественные закономерности развития геолого-геофизической среды Центральной Азии в связи с сейсмичностью региона; – сделано генеральное тектонофизическое заключение о том, что источником сильных колебаний поверхности является тектоническое дробление сейсмоактивной среды в неких объемах и прорастание в ней протяженных разломов;

 построены карты активных разломов Байкальской рифтогенной впадины, современной геодинамики Азии, неотектоники северо-восточного сектора Азии;

 начаты работы по прогнозу землетрясений в Байкальском регионе.

Подводя итог историческому обзору развития тектонофизических и геодинамических исследований в лаборатории тектонофизики и Институте земной коры СО РАН, отметим, что в перспективе необходимо развернуть исследования в области оценок энергетики природных процессов с целью более полного перехода от полуколичественных моделей взаимодействия природных процессов к их количественному отображению. Это, вероятно, правильный путь к оценке геодинамической активности литосферы, ее картографированию на принципиально новой основе и изучению взаимодействия параметров природных процессов.

Следующим моментом может являться углубленный анализ месторождений полезных ископаемых, возникших в отдаленном геологическом прошлом в подвижных поясах Земли, с целью ретроспективного воспроизведения развития сейсмического процесса в прошлые геодинамические эпохи и оценки темпов денудации земной поверхности комплексом экзогеодинамических процессов.

Еще одним направлением этих исследований должно стать изучение взаимодействия геосфер между собой и в связи с вариациями солнечной активности. В рамках таких исследований открываются перспективы восстановления природно-климатических обстановок прошлого и прогноза их эволюции в будущем для обеспечения устойчивого развития нынешней цивилизации.

Всех проблем, конечно, не удастся решить, но стремиться к этому следует, помня высказывание И. Канта, помещенное в эпиграфе. И не приумножайте сущностей сверх необходимого.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Belousov V.V., Gzovsky M.V., 1964. Experimental Tectonics. Nedra, Moscow, 119 p. (in Russian) [Белоусов В.В., Гзовский М.В. Экспериментальная тектоника. М.: Недра, 1964. 119 с.].
- *Devdariani A.S.*, 1967. Mathematical Analysis in Geomorphology. Nedra, Moscow, 155 p. (in Russian) [*Девдариани А.С.* Математический анализ в геоморфологии. М.: Недра, 1967. 155 с.].
- *Devdariani A.S.*, 1974. Signals from the Earth's Interior and Its Geological Past. Nedra, Moscow, 104 p. (in Russian) [*Дев- дариани А.С.* Сигналы из глубин Земли и ее геологического прошлого. М.: Недра, 1974. 104 с.].
- Filosofov V.P., 1975. Fundamentals of the Morphometric Method for Detection of Tectonic Structures. Saratov Publishing House of the Saratov University, Saratov, 232 р. (in Russian) [Философов В.П. Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1975. 232 с.].

Gzovsky M.V., 1959. Main Aspects of Tectonophysics and Tectonics of the Baidzhansai Anticlinorium. Volumes I and II.

Publishing House of the USSR Acad. Sci., Moscow, 256 р. (in Russian) [*Гзовский М.В.* Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория. М.: Изд-во АН СССР, 1959. Ч. І и II. 256 с.].

- *Gzovsky M.V.*, 1975. Fundamentals of Tectonophysics. Nauka, Moscow, 536 p. (in Russian) [*Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.].
- Gzovsky M.V., Krestnikov V.I., Reisner G.I., 1959. Geological methods for estimation of average tectonic movement velocity gradients and results of their application. Izvestiya AN SSSR 8, 1147–1156 (in Russian) [Гзовский М.В., Крестников В.И., Рейснер Г.И. Геологические методы определения средней величины градиента скорости тектонических движений и результаты их применения // Известия АН СССР. Серия геофизическая. 1959. № 8. С. 1147–1156].
- *Levi K.G.*, 1981. Vertical movements of the crust in the Baikal rift zone. In: Problems of Fault Tectonics. Nauka, Novosibirsk, p. 142–170 (in Russian) [*Леви К.Г.* Вертикальные движения земной коры в Байкальской рифтовой зоне // Проблемы разломной тектоники. Новосибирск: Наука, 1981. С. 142–170].
- Levi K.G., 1985. The system approach as a methodological basis for quantitative analysis of geological information. In: Quantitative analysis of geological phenomena. Book II, Irkutsk, p. 229–240 (in Russian) [Леви К.Г. Системный подход – методологическая основа количественного анализа геологической информации // Количественный анализ геологических явлений. Иркутск, 1985. Сб. II. С. 229–240].
- Levi K.G., 1987. 'Seismic structures' of the lithosphere and tectonics movements. In: Topic problems of recent geodynamics and the deep structure of the USSR Territory. Abstracts of the 20th All-Union Tectonic Meeting, Moscow, p. 9 (in Russian) [Леви К.Г. «Сейсмические структуры» литосферы и тектонические движения // Актуальные проблемы современной геодинамики и глубинного строения территории СССР: Тез. докл. XX Всес. тектонич. совещ. М., 1987. С. 9].
- *Levi K.G.*, 1988. Tectonic movements, seismically active and seismicity-generating layers of the continental lithosphere. *Doklady AN SSSR* 300 (6), 1424–1426 (in Russian) [*Леви К.Г.* Тектонические движения, сейсмоактивный и сейсмогенерирующий слои континентальной литосферы // Доклады АН СССР. 1988. Т. 300. № 6. С. 1424–1426].
- *Levi K.G.*, 1991. Neotectonic Movements in Seismically Active Zones of the Lithosphere. Nauka, Novosibirsk, 166 р. (in Russian) [*Леви К.Г.* Неотектонические движения в сейсмоактивных зонах литосферы. Новосибирск: Наука, 1991. 166 с.].
- *Levi K.G.*, 1995. Application of Quantitative Methods to Geomorphology. Guidebook. Publishing House of the Irkutsk State University, Irkutsk, 52 p. (in Russian) [*Леви К.Г.* Применение количественных методов в геоморфологии. Методическое пособие. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1995. 52 с.].
- Levi K.G., Lysak S.V., 1986. Thermal evolution and thickness of the continental lithosphere. In: Major problems of seismotectonics. Nauka, Moscow, p. 69–78 (in Russian) [Леви К.Г. Лысак С.В. Термальная эволюция и мощность литосферы континентов // Основные проблемы сейсмотектоники. М.: Наука, 1986. С. 69–78].
- Levi K.G., Miroshnitchenko A.I., San'kov V.A., Babushkin S.M., Larkin G.V., Badardinov A.A., Wong H.K., Colman S., Delvaux D., 1997. Active faults of the Baikall depression. Bulletin du Centre de recherches Elf Exploration Production 21 (2), 399–434.
- Levi K.G., Sherman S.I., 1995. Applied Geodynamic Analysis. Musee Royal de L'Afrique Centrale. Tervuren. Belgique annales. Sciences Geologiques, V. 100, 133 p.
- *Levi K.G., Sherman S.I., Plyusnina L.V.,* 1993. Neotectonics. In: Atlas of Lake Baikal. Federal Survey of Geodesy and Cartography of Russia, Moscow, p. 26–27 (in Russian) [*Леви К.Г., Шерман С.И., Плюснина Л.В.* Новейшая тектоника // Атлас Байкала. Москва: Федеральная служба геодезии и картографии России, 1993. С. 26–27].
- *Levi K.G., Sherman S.I., San'kov V.A.,* 2009. Recent geodynamics of Asia: Map, principles of its compilation, and geodynamic analysis. *Geotectonics* 43 (2), 152–165. http://dx.doi.org/10.1134/S001685210902006X.
- Levi K.G., Zadonina N.V., Yazev S.A., 2010. Radio-Carbon Dating of Natural and Social Phenomena in the Northern Hemisphere. Publishing House of the Irkutsk State University, Irkutsk, 718 p. (in Russian) [Леви К.Г., Задонина Н.В., Язев С.А. Радиоуглеродная хронология природных и социальных феноменов Северного полушария. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2010. 718 с.].
- *Levi K.G., Zadonina N.V., Yazev S.A., Voronin V.I.*, 2012. Recent Geodynamics and Heliogeodynamics. Textbook. Publishing House of the Irkutsk State University, Irkutsk, 539 p. (in Russian) [*Леви К.Г., Задонина Н.В., Язев С.А., Воронин В.И.* Современная геодинамика и гелиогеодинамика: Учебное пособие. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2012. 539 с.].
- Logatchev N.A., Sherman S.I., Levi K.G., 1986. Geodynamic activity of the lithosphere in the territory of Siberia in the Cenozoic // Doklady AN SSSR 289 (6), 1458–1462 (in Russian) [Логачев Н.А., Шерман С.И., Леви К.Г. Геодинамическая активность литосферы территории Сибири в кайнозое // Доклады АН СССР. 1986. Т. 289. № 6. С. 1458–1462].
- Logatchev N.A., Sherman S.I., Levi K.G., 1987a. Geodynamic activity of the lithosphere, its integral assessment and relation to seismicity. In: Recent tectonic activity of the Earth and seismicity. Abstracts of the 19th All-Union Tectonic Meeting. Nauka, Moscow, p. 14–16 (in Russian) [Логачев Н.А., Шерман С.И., Леви К.Г. Геодинамическая активность литосферы, ее интегральная оценка и связь с сейсмичностью // Современная тектоническая активность Земли и сейсмичность: Тез. докл. XIX Всес. тектонич. совещ. М.: Наука, 1987a. С. 14–16].
- Logatchev N.A., Sherman S.I., Levi K.G., 1987b. Geodynamic activity of the lithosphere in Siberia in the Cenozoic. Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics) 8, 3–10 (in Russian) [Логачев Н.А., Шерман С.И., Леви К.Г. Геодинамическая активность литосферы Сибири в кайнозое // Геология и геофизика. 1987б. № 8. С. 3–10].

Logatchev N.A., Sherman S.I., Levi K.G., 1987c. Geodynamic regimes and factors of geodynamic activity of the lithosphere.

In: Intracontinental mountainous regions: Geological and geophysical aspects. International Symposium. Irkutsk, p. 326–329 (in Russian) [*Логачев Н.А., Шерман С.И., Леви К.Г.* Геодинамические режимы и факторы геодинамической активности литосферы // Внутриконтинентальные горные области: геологические и геофизические аспекты. Международный симпозиум. Иркутск, 1987в. С. 326–329].

- Neotectonics Map of the North-Eastern Sector of Asia, 2008. Scale 1:75,000,000. Author: K.G. Levi. VSAGP, Irkutsk (in Russian) [Карта неотектоники северо-восточного сектора Азии. М-б 1:75000000. Автор: К.Г. Леви. Иркутск: ВСАГП, 2008].
- *Recent Geodynamics Map of Asia*, 2007. Scale 1:25,000,000. Authors: K.G. Levi, S.I. Sherman, V.A. San'kov et al. VSAGP, Irkutsk (in Russian) [Карта современной геодинамики Азии. М-б 1:25000000. Авторы: К.Г. Леви, С.И. Шерман, В.А. Саньков и др. Иркутск: ВСАГП, 2007].
- Ruzhich V.V., 1997. Seismotectonic Destruction of the Earth's Crust in the Baikal Rift Zone. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 144 p. (in Russian) [*Ружич В.В.* Сейсмотектоническая деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 144 с.].
- Ruzhich V.V., Levina E.A., 2013. Results and problems of earthquake forecasting in the Baikal rift zone. In: Physics and forecasting of rock destruction. Abstract of the 9th International Workshop. September 2–6, 2013. Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, p. 76 (in Russian) [Ружич В.В., Левина Е.А. Результаты и проблемы прогноза землетрясений в Байкальской рифтовой зоне // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: Тез. докл. IX международной школы-семинара. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2013. С. 76].
- San'kov V.A., Dneprovsky Yu.I., Kovalenko S.N. et al., 1991. Faults and Seismicity of the Northern Muya Geogynamic Polygon. Nauka, Novosibirsk, 111 p. (in Russian) [Саньков В.А., Днепровский Ю.И., Коваленко С.Н. и др. Разломы и сейсмичность Северо-Муйского геодинамического полигона. Новосибирск: Наука, 1991. 111 с.].
- Sherman S.I., 1977. Physical Regularities of Faulting in the Earth's Crust. Nauka, Novosibirsk, 102 p. (in Russian) [Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск: Наука, 1977. 102 с.].
- Sherman S.I., 2005. Tectonophysical analysis of the seismic process in zones of active faults in the lithosphere and the problem of medium-term forecasting of earthquakes // *Geofizichesky Zhurnal (Geophysical Journal)* 27(1), 20–38 (in Russian) [Шерман С.И. Тектонофизический анализ сейсмического процесса в зонах активных разломов литосферы и проблема среднесрочного прогноза землетрясений // *Геофизический журнал*. 2005. Т. 27. № 1. С. 20–38].
- *Sherman S.I.*, 2012. Destruction of the lithosphere: Fault-block divisibility and its tectonophysical regularities. *Geodynamics* & *Tectonophysics* 3 (4), 315–344. http://dx.doi.org/10.5800/GT-2012-3-4-0077.
- Sherman S.I., 2012. Destructive zones of the lithosphere in Central Asia and their activation at the recent geodynamic stage. In: Recent geodynamics of Central Asia. The All-Russia Meeting. September 23–29, 2012, Irkutsk. Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, P. 91–93 (in Russian) [Шерман С.И. Деструктивные зоны литосферы Центральной Азии и их активизация на современном геодинамическом этапе // Современная геодинамика Центральной Азии: Всерос. совещ. 23–29 сентября 2012 г., г. Иркутск. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. С. 91–93].
- Sherman S.I., 2013. Deformation waves as a trigger mechanism of seismic activity in seismic zones of the continental lithosphere. Geodynamics & Tectonophysics 4 (2), 83–117. http://dx.doi.org/10.5800/GT-2013-4-2-0093.
- Sherman S.I., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu., Gromin V.I., 1983. Areas of Dynamic Influence of Faults: Modelling Results. Nauka, Novosibirsk, 110 p. (in Russian) [Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю., В.И Громин. Области динамического влияния разломов: результаты моделирования. Новосибирск: Наука, 1983. 110 с.].
- Sherman S.I., Gorbunova E.A., 2008. The wave nature of fault activation in Central Asia according to seismic monitoring // Fizicheskaya Mezomekhanika (Physical Mesomechanics) 11 (1), 115–122 (in Russian) [Шерман С.И., Горбунова Е.А. Волновая природа активизации разломов Центральной Азии на базе сейсмического мониторинга // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11. № 1. С. 115–122].
- Sherman S.I., Levi K.G., 1978. Transform faults of the Baikal rift zone and seismicity of its flanks. In: Tectonics and seismicity of continental rift zones. Nauka, Moscow, p. 7–18 (in Russian) [Шерман С.И., Леви К.Г. Трансформные разломы Байкальской рифтовой зоны и сейсмичность ее флангов // Тектоника и сейсмичность континентальных рифтовых зон. М.: Наука, 1978. С. 7–18].
- Sherman S.I., Lobatskaya R.M., 1981. The Method of Study and Experiences of Application of Quantitative Parameters of Faults to Geological Studies. VostSibNIIGGiMS, Irkutsk, 42 p. (in Russian) [Шерман С.И., Лобацкая Р.М. Методика изучения и опыт использования количественных параметров разрывов при геологических исследованиях. Ир-кутск: ВостСибНИГГиМС, 1981. 42 с.].
- Sherman S.I., Lysak S.V., Gorbunova E.A., 2012. A tectonophysical model of the Baikal seismic zone: testing and implications for medium-term earthquake prediction. *Russian Geology and Geophysics* 53 (4), 392–405. http://dx.doi. org/10.1016/j.rgg.2012.03.003.
- Sherman S.I., Savitsky V.A., 2006. New data on quasi-periodical regularities in activation of fractures in real time based on monitoring of magnitudes of seismic events: Case study of the Baikal rift system. Doklady Earth sciences 408 (1), 640– 644. http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X06040295.
- Structures of non-stratified geological bodies, 2014. Electronic resource (in Russian) [Структуры нестратифицированных геологических тел. 2014. Электронный ресурс: код доступа http://znanie.podelise.ru/docs/91418/index-1736.html].

- Zadonina N.V., Levi K.G., 2008. The Chronology of Natural and Social Phenomena in Siberia and Mongolia. Publishing House of Irkutsk State University, Irkutsk. 760 p. (in Russian) [Задонина Н.В., Леви К.Г. Хронология природных и социальных феноменов в Сибири и Монголии. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2008. 760 с.].
- Zadonina N.V., Levi K.G., 2009. The Chronology of Natural and Social Phenomena in the Global Civilization History. Publishing House of Irkutsk State University, Irkutsk, 864 p. (in Russian) [Задонина Н.В., Леви К.Г. Хронология природных и социальных феноменов в истории мировой цивилизации. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2009. 864 с.].
- Zadonina N.V., Levi K.G., Yazev S.A., 2007. Space Hazard in Geology and History of the Earth. Institute of the Earth's Crust, Irkutsk, 77 p. (in Russian) [Задонина Н.В., Леви К.Г., Язев С.А. Космические опасности геологического и исторического прошлого Земли. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007. 77 с.].
- Zadonina N.V., San'kov V.A., Levi K.G., 2004. Recent Geodynamics and Heliogeodynamics. Natural Catastrophes and Organization of Preventive Actions in Case of Emergencies. Book 4. Publishing House of the Irkutsk State Technical University, Irkutsk, 86 p. (in Russian) [Задонина Н.В., Саньков В.А., Леви К.Г. Современная геодинамика и гелиогеодинамика. Природные катастрофы и организация превентивных мероприятий при чрезвычайных ситуациях. Книга 4. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. 86 с.].



Леви Кирилл Георгиевич, докт. геол.-мин. наук, профессор, зам. директора института по науке Институт земной коры СО РАН 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия Тел. (3952)424562; e-mail: levi@crust.irk.ru

Levi, Kirill G., Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Deputy Director Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS 128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia Tel. +7(3952)424562; e-mail: levi@crust.irk.ru