



## SEISMITES OF THE SOUTHERN EAST SIBERIA: RESEARCH PROBLEMS AND PERSPECTIVES

A. S. Gladkov, O. V. Lunina

*Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, 664033, Irkutsk, Lermontov street, 128, Russia*

**Abstract:** The article reviews research problems and perspectives of studying the secondary seismogenic deformations of vibrational type (termed «seismites») that are revealed in soft sediments in the territory of the Southern East Siberia. Proposed are ways and principles based on which criteria can be developed for definition of similar structures in view of wide propagation of cryogenic processes. Studies to reveal seismites in cross-sections of the Selenga river delta, the Tunka basin and the southern part of the Siberian platform have been conducted; some of the research results are presented in the article.

**Keywords:** seismites, loose sediments, south of East Siberia, earthquakes, cryogenic processes.

Recommended by K.Zh. Seminsky 12 July 2010

*Gladkov A.S., Lunina O.V. Seismites of the Southern East Siberia: research problems and perspectives // Geodynamics & Tectonophysics. 2010. V. 1. № 3. P. 249–272.*

## СЕЙСМИТЫ ЮГА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗУЧЕНИЯ

А. С. Гладков, О. В. Лунина

*Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия*

**Аннотация:** В статье рассматриваются проблемы и перспективы исследований вторичных сейсмогенных деформаций вибрационного типа (сейсмидов) в рыхлых отложениях на территории юга Восточной Сибири. Предложены пути и принципы разработки критериев выделения подобных структур на фоне широкого развития криогенных процессов. Приведены результаты изучения разрезов, содержащих сейсмиды на различных площадях (дельта р. Селенги, Тункинская долина и юг Сибирской платформы).

**Ключевые слова:** сейсмиды, рыхлые отложения, юг Восточной Сибири, землетрясения, криогенные процессы.

## ВВЕДЕНИЕ

Крупные сейсмические события (сильные землетрясения) оставляют в горных породах многочисленные следы в виде разнообразных деформаций. Анализ пространственного распределения и возрастных характеристик таких деформаций позволяет определять и уточнять параметры современных сейсмических событий и сейсмогенерирующих структур, а также выявлять местоположения эпицентров палеоземлетрясений, поэтому их поиск и характеристика являются неотъемлемой частью сейсмогеологических исследований практически во всех регионах мира, для которых характерна повышенная сейсмичность. При этом, как показывает анализ зарубежных публикаций, довольно часто объектами исследований являются сейсмогенные деформации в рыхлых водонасыщенных отложениях, для обозначения которых используется термин «сейсмита».

Необходимо отметить, что в 50–70-е годы прошлого века сибирские ученые были одними из пионеров развития сейсмогеологических исследований. Разработанный В.П. Солоненко палеосейсмогеологический метод [Солоненко, 1973] был направлен на изучение сейсмогенных деформаций различного масштаба, в том числе и тех, которые сейчас известны как сейсмита (seismites). Однако подобным образованиям, в отличие от крупномасштабных сейсмодислокаций и обвалов, отводилась роль второстепенных структур, позволяющих подчеркнуть особенности строения различных участков в плейстосейстовых зонах. К сожалению, в дальнейшем сибирские научные коллективы, в силу различных причин, утратили лидирующие позиции в палеосейсмогеологических исследованиях, ведущая роль в которых сейчас принадлежит зарубежным ученым. Именно ими и было введено понятие сейсмита [Seilacher, 1969], а также разработаны приемы изучения этих деформаций и методики использования результатов при различных сеймотектонических построениях.

В отличие от зарубежных исследований, в которых сейсмита отводится значительная роль, российские работы, посвященные рассмотрению подобных структур, не столь многочисленны и носят, по большей части, описательный характер [Корженков и др., 1999; Поволоцкая и др., 2006; Георгиевский, Тевелев 2007; Георгиевский, 2008; Деев и др., 2009; Николаева, 2009; и др.]. Работы, в которых сейсмита связываются с конкретными землетрясениями и используются для палеосейсмологических реконструкций, еще более редки [Корженков, 2006; Никонов, 2007; и др.]. Между тем задачи по оценке сейсмической опасности активных регионов по-прежнему весьма актуальны, а для их решения на современном уровне требуется всесторонняя характеристика особенностей проявления эффектов сильных землетрясений, в том числе сейсмита. Иными словами, налицо необходимость наращивания данного вида исследований и более широкой его интеграции в комплекс методов, используе-

мых при работах в сейсмоопасных регионах России.

Одним из таких регионов является юг Восточной Сибири, в пределах которого расположена Байкальская рифтовая зона. Область повышенной сейсмичности, генерируемой в результате раскрытия Байкальского рифта, оказывает значительное влияние и на сопредельные территории, в частности на значительные площади южной окраины Сибирской платформы, приграничные со смежной рифтовой зоной (рис. 1), для которых характерна повышенная плотность крупных населенных пунктов, а также народнохозяйственных сооружений и объектов. Развитие промышленной инфраструктуры и городов региона требует постоянного уточнения и детализации карт сейсмического районирования, учета сейсмического фактора при обосновании участков под строительство транспортных магистралей, различных трубопроводов, а также зданий и сооружений.

Несмотря на благоприятные предпосылки для образования сейсмита (высокая сейсмичность региона, широкое развитие рыхлых толщ озерного, озерно-болотного и аллювиального генезиса, соответствующего гранулометрического состава и строения), в течение долгого времени задачи по выявлению подобных структур, в силу различных причин, не ставились и не решались. Начиная с 2002 г., в процессе проведения исследований по изучению зон активных разломов в разных районах региона нами регулярно фиксировались деформационные структуры в рыхлых отложениях. Часть подобных структур были идентифицированы как сейсмогенные. Некоторые из них можно увязать с известными палеособытиями, а для других возможные сейсмогенные источники еще необходимо устанавливать [Гладков и др., 2005; Лунина и др., 2009]. Проведенные работы показали, что изучение сейсмита на площади Восточной Сибири (равно как и на большей части территории России) существенно затрудняется из-за проявления следов современных мерзлотных процессов. Криогенные структуры в рыхлых отложениях мало отличаются от деформаций, образуемых в результате воздействия сейсмических событий, поэтому в условиях широкого развития многолетнемерзлых пород выявление и изучение сейсмогенных форм представляют собой значительную проблему. Следовательно, постановка масштабных работ по изучению сейсмита на территории Восточной Сибири требует предварительного обоснования принципов их выделения на фоне следов мерзлотных явлений, а также оценки возможного влияния сейсмогенного и криогенного процессов на особенности проявления деформационных структур другого типа.

В качестве первого шага по решению этой непростой задачи в настоящей статье мы попытались охарактеризовать особенности проявления сейсмита в рыхлых отложениях, а также наметить различия между ними и мерзлотными структурами на основе известных публикаций и результатов, полученных нами в процессе полевых работ на территории юга Восточной Сибири.

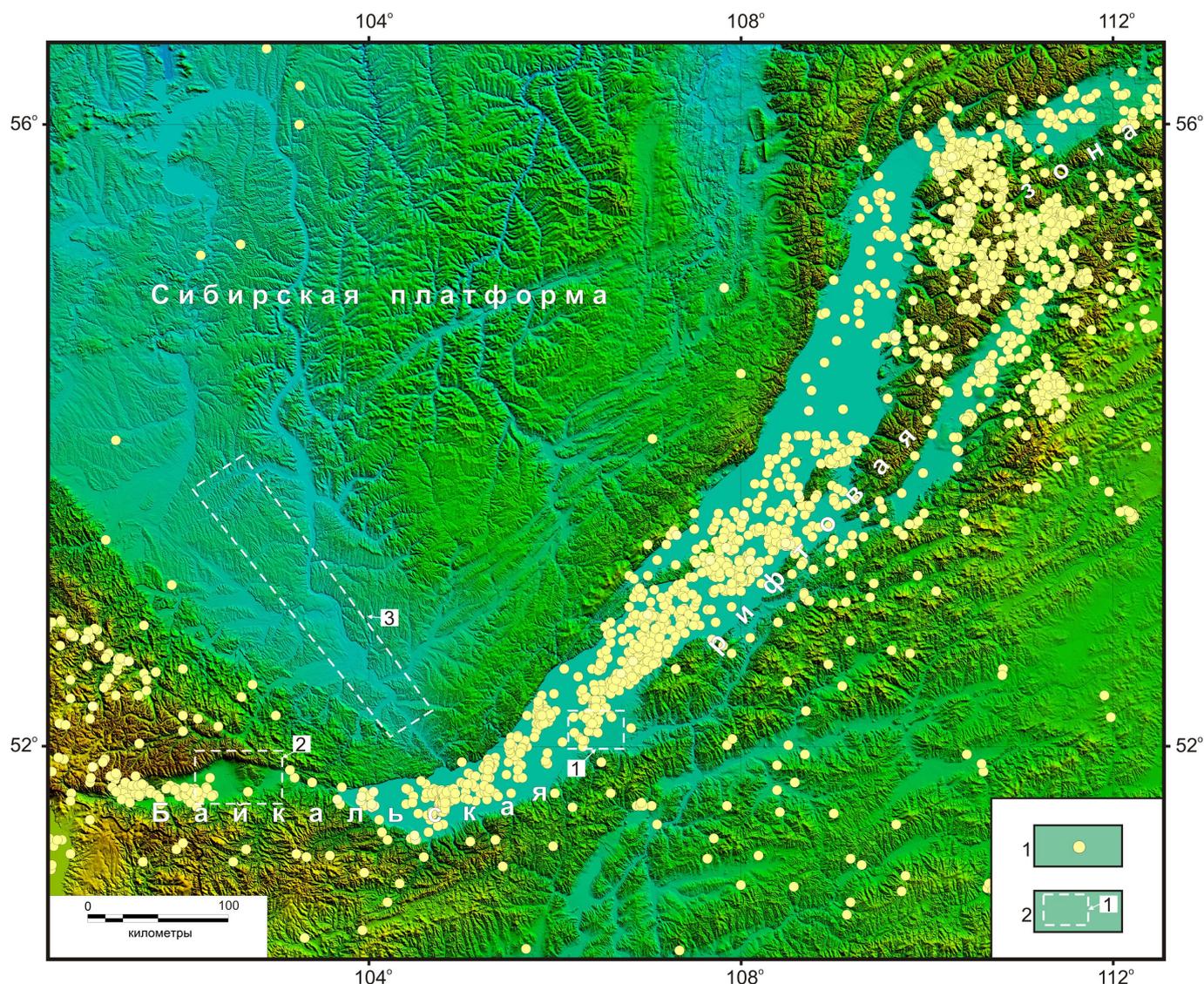


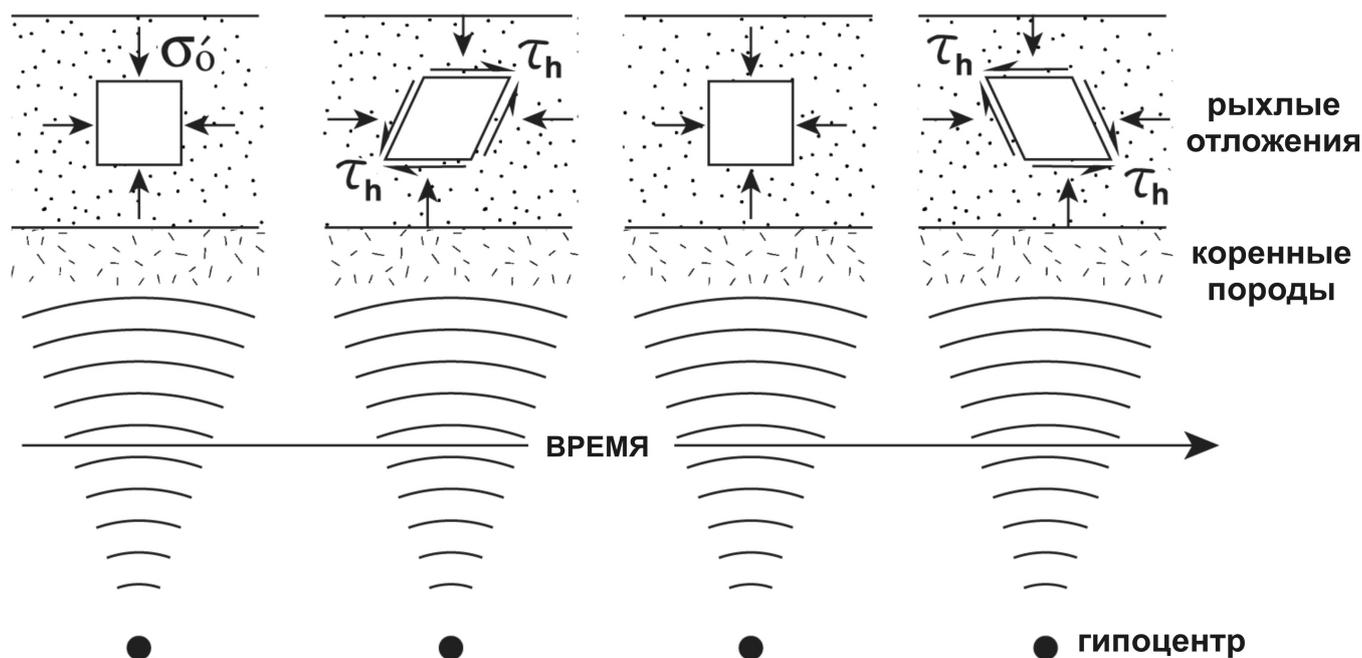
Рис. 1. Распределение землетрясений в пределах Байкальской рифтовой зоны. 1 – эпицентры землетрясений энергетического класса  $\geq 10$  ( $M \geq 3.3$ ); 2 – площади изучения сейсмита: 1 – дельта р. Селенги, 2 – Тункинская долина, 3 – юг Сибирской платформы.

Fig. 1. Distribution of earthquakes within the Baikal rift zone. 1 – earthquake epicenters with energetic class  $\geq 10$  ( $M \geq 3.3$ ); 2 – areas wherein seismites are studied: 1 – the Selenga river delta, 2 – the Tunka basin, 3 – the southern part of the Siberian platform.

### ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ СЕЙСМИТОВ

Анализ литературы показывает, что деформационные структуры, которые называются «сейсмита», относятся к типу «soft-sediment» деформаций и, соответственно, проявляются исключительно в рыхлых отложениях [Obermeier, 1996; Montenat et al., 2007; и др.]. Данный термин является собирательным. Он используется для обозначения широкого спектра форм и типов сейсмогенных дислокаций, и поэтому строгого определения его нет. Изначально, А. Сейлахер использовал данное название для характеристики участков, отличительной чертой которых было наличие водонасыщенного слоя, который в процессе землетрясения подвергался разжижению и вызывал в перекрывающих (или подстилаю-

щих) слоях деформации типа «fault-graded beds» [Seilacher, 1969]. В дальнейшем к сейсмитам стали относить любые дислокации, формирование которых происходило в результате разжижения грунтов и сопровождающих его явлений подъема различных флюидов (воды, газов, песчаных и грязевых масс и т.д.) под влиянием сейсмических волн и вибрации [Sims, 1975; Hempton, Dewey, 1983; Obermeier, 1996, 1998; Obermeier et al., 2005; Alfaro et al., 2001; Fortuin, Dabrio, 2008; Reddy et al., 2009; Moernaut, 2009; и мн. др.]. На земной поверхности они фиксируются площадными излияниями грязи и водно-песчаной смеси, грязевыми вулканами, грифонами. В толще осадков проявления подобных дислокаций существенно разнообразнее. Здесь наряду с каналами (в том числе и слепыми), обеспечивающими подъем грязевых масс к поверхности, присутствуют дефор-



**Рис. 2.** Схематический вертикальный разрез, показывающий идеализированное изменение во времени условий нагружения в толще рыхлых отложений под действием энергии распространяющейся вверх из гипоцентра, по [Obermeier, 1996]. Напряжения показывают предваряющее разжижение, циклическое изменение условий нагружения.  $\sigma_0$  – первичное вертикальное эффективное напряжение, обусловленное весом вышележащих пород,  $\tau_h$  – индуцированные землетрясением циклические изменения касательных напряжений.

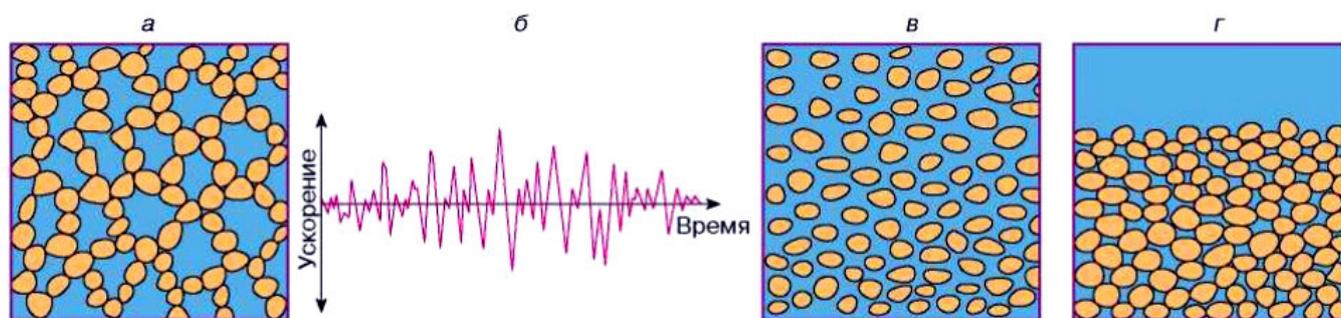
**Fig. 2.** Schematic vertical section showing idealized field loading conditions changing with time as energy propagates upward from hypocenter, after [Obermeier, 1996]. Stresses shown represent preliquefaction cyclic loading condition.  $\sigma_0$  = initial vertical effective overburden stress;  $\tau_h$  = earthquake-induced horizontal cyclic shear stress.

мации, возникающие в результате проваливания, выдавливания или перемешивания слоев, перешедших в процессе землетрясения в жидкое состояние, а также в результате воздействия последних на более плотные, неразжиженные отложения (если таковые имеются).

Наиболее подвержены сейсмогенному разжижению водонасыщенные песчаные отложения, причем самыми благоприятными для развития этого процесса являются тонкозернистые пески и лессы. Как показывает опыт, дислокации обычно развиваются на участках, где пески перекрыты слоями более плотных (компетентных) глин [Fortuin, Dabrio, 2008]. Основным механизмом, определяющим сейсмогенное разжижение и деформирование грунтов, является циклическое изменение касательных напряжений (рис. 2), вызываемое прохождением сейсмических волн. В результате возникают колебания частиц грунта и контакты между ними разрываются. При этом высвобождается вода, заполнявшая пространство между зернами, и грунты приобретают свойство жидкости с взвешенными частицами. В работах разных авторов [Иванов, 1991; Вознесенский, 1998; Obermeier et al., 2005; Ишихара, 2006; и др.] приводятся следующие этапы сейсмогенного разжижения грунтов: разрушение структуры; собственно разжижение несвязного грунта и последующее уплотнение грунта с отжатием части воды (рис. 3). Считается, что разрушение структуры на-

чинается при сдвиге одного ряда частиц относительно другого, потере контактов между частицами, передаче давления от веса частиц на воду и возникновении аномального порового давления в жидкости; затем зерна грунта приобретают более плотную укладку. Циклические изменения соотношений порового и литостатического давлений, сопровождающие процессы разжижения и уплотнения грунта, приводят к флюидизации перекрывающих и, отчасти, подстилающих отложений за счет отжимания воды и взвешенных в ней частиц с формированием структур истечения (water-escape structures) [Lowe, 1975]. Основными путями миграции грязевых и водных масс (вплоть до выброса на дневную поверхность) являются трещины гидроразрыва, которые могут быть как вертикальными, наклонными, так и межслоевыми [Obermeier, 1996; Obermeier et al., 2005].

Помимо наличия разжижения осадков, еще одним условием, отличающим сейсмиту от других сейсмогенных деформаций в рыхлых отложениях, является обязательное отсутствие следов гравитационного соскальзывания материала [Корженков, 2006; Montenat et al., 2007]. С точки зрения существующих в России классификаций сейсмогенных структур [Солоненко, 1988; Рогожин, 2000], подобные образования являются вторичными сейсмодислокациями вибрационного типа. Исходя из этого, можно предложить следующее определение терми-



**Рис. 3.** Причины и последовательность сейсмогенного разжижения грунтов, по [Вознесенский, 1998]. а – рыхлый водонасыщенный песок с крупными порами до землетрясения; б – сейсмический толчок – характерная запись изменения ускорения колебаний во времени; в – момент разжижения – связи между частицами грунта разорваны, и они оказываются взвешенными в воде; г – уплотненный песок после отжатия воды и оседания частиц.

**Fig. 3.** Causes and sequence of seismogenic ground liquefaction, [after Вознесенский, 1998]. а – soft water-saturated sand with big pores before an earthquake; б – seismic shock – typical record of changing wave acceleration with a time; в – liquefaction moment – contacts between ground fractions are broken, and the fractions are suspended in water; г – packed sand after release of water and settlement of fractions.

на «сейсмиды» – это вторичные сейсмогенные дислокации, сформированные в результате развития процессов разжижения и флюидизации горизонтально залегающих осадочных толщ (слоев) под воздействием сейсмических волн и вибраций.

Наиболее полный на настоящее время обзор зарубежных работ, посвященных сейсмидам, представлен в статье К. Монтеня с соавторами [Montenat et al., 2007]. Данное обобщение позволяет получить представление о многообразии структурных форм, которые могут быть образованы в результате сейсмогенного разжижения грунтов и взаимодействия их с перекрывающими и подстилающими толщами (рис. 4), а также позволило вышеупомянутым авторам разработать вариант классификации сейсмидов. Не останавливаясь на критике принципов выделения данными исследователями основных групп эффектов от землетрясений в осадках и горных породах, остановимся на разделе, характеризующем собственно сейсмиды (рис. 4). Для них предлагается деление деформаций на хрупкие и пластические. К хрупким отнесены инъекционные и нептунические дайки, аутокластические брекчии, трещины прорыва, структуры «fault-grading», а также минеральные жилы (?), т.е. дислокации, в строении которых, по мнению авторов, заметную роль играют разрывы. Соответственно, к пластическим деформациям были отнесены такие следы проявления разжижения, как тиксотропные конусы, тиксотропные клинья и общее разжижение, экструзии и выброс флюидов, пластические интрузии, а также разнообразные конволюции. При этом подчеркивается, что в каждом конкретном случае набор формируемых структур зависит от целого ряда факторов: климатических условий территории, мощности и особенностей строения чехла рыхлых отложений, физико-механических свойств и гранулометрического состава слагающих его отложений, степени обводненности пород, глубины залегания зеркала подземных вод и некоторых других.

Отметим, что и другие известные классификации

деформаций в рыхлых отложениях, включая и сейсмиды (например [Alfaro et al., 2001; Гладков, Лунина, 2007; и др.]), также основаны на том факте, что их структурные формы являются результатом проявления и/или сочетания деформаций различных типов – пластических и разрывных (хрупких). Первые из них развиваются непосредственно в разжиженных толщах в результате перемешивания, перетекания, погружения или всплывания слоев, имеющих разные физико-механические свойства. Они заметно усиливаются в моменты аномального возрастания порового давления. Разрывные деформации, как упоминалось выше, образуются в перекрывающих слоях в результате прохождения сейсмических волн (сколовые и отрывные трещины), а также в результате воздействия на них разжиженных осадков при аномальном увеличении порового давления (гидроразрывы). Кроме того, в процессе землетрясения зачастую происходит активизация существовавших ранее в рыхлых толщах разрывов различного генезиса. Раскрытые полости трещин и разрывов являются каналами, по которым происходит выдавливание и выброс разжиженного материала в моменты аномального возрастания порового давления, а также затягивание частиц нижележащих и/или вышележащих слоев в процессе флюидизации.

Однако применительно к сейсмидам выделение хрупкого типа деформаций (разрывов) в самостоятельную группу, как это сделано в классификациях зарубежных исследователей [Alfaro et al., 2001; Montenat et al., 2007] представляется спорным прежде всего потому, что в сейсмидам данный вид дислокаций практически не проявляется без сочетания с пластической составляющей (например, разрыв растяжения + пластическое заполнение в процессе флюидизации = инъекционная дайка; или трещины и/или каналы прорыва + выброс водно-грязевых пластичных масс = грязевый вулкан). Также значительная часть разрывных структур, используемых для внедрения и заполнения раз-

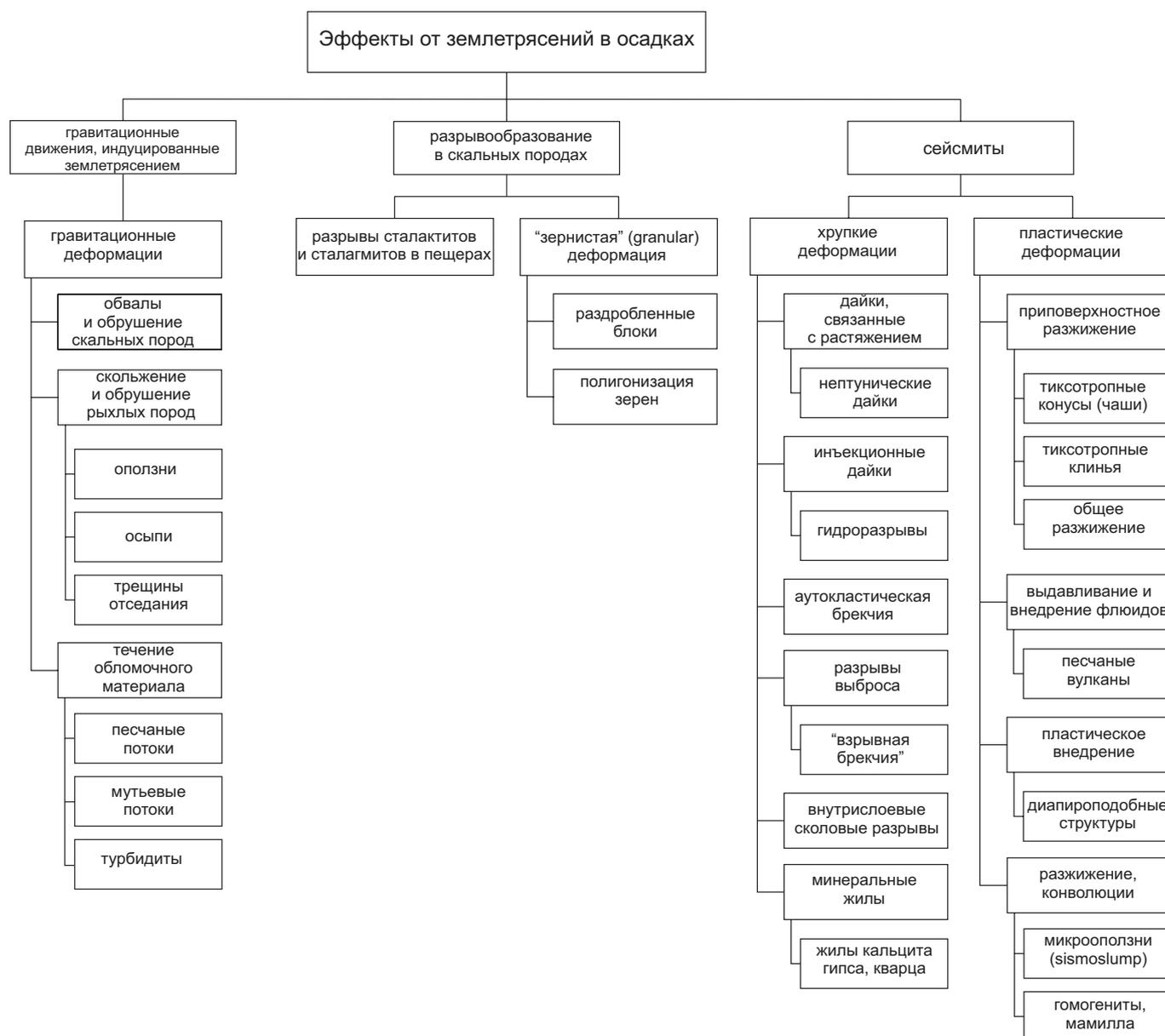


Рис. 4. Классификация деформационных структур, индуцируемых землетрясениями, по [Montenat et al., 2007].

Fig. 4. Classification of deformation structures induced by earthquakes, after [Montenat et al., 2007].

жиженным веществом, могла быть сформирована под действием других сил и в процессе землетрясения лишь активизирована. Кроме того, отсутствие наполнения в крупных сейсмогенных трещинах и разрывах делает проблематичным отнесение их к сейсмитами, поскольку нет признаков, по которым их можно было бы отличить от первичных сейсмогенных разрывов. Исходя из этих соображений, более строгим и правильным представляется разделение сейсмитами по характеру проявления деформаций на две группы: пластические и хрупко-пластические.

Особенности формирования и различные формы проявления сейсмитами воспроизведены в различных экспериментальных работах. Данные исследования прошли путь от моделирования, исполь-

зующего простое визуальное соответствие природным объектам структур, получаемых в результате встряхивания водонасыщенных осадков [Kuenen, 1958], до воспроизведения структурных форм в водонасыщенных осадках различного состава при воздействии колебаний с параметрами, близкими к реальным сейсмическим сотрясениям [Moretti et al., 1999]. М. Моретти и его соавторами в экспериментах были воспроизведены основные параметры землетрясения с  $M_L=7.1$ , произошедшего 17 октября 1989 г. в Лос-Анджелесе. Ими было показано, что тип и форма образуемых структур полностью зависят от состава и строения осадочного разреза (рис. 5). Особо следует отметить, тот факт, что в пределах гомогенных тонкозернистых толщ де-

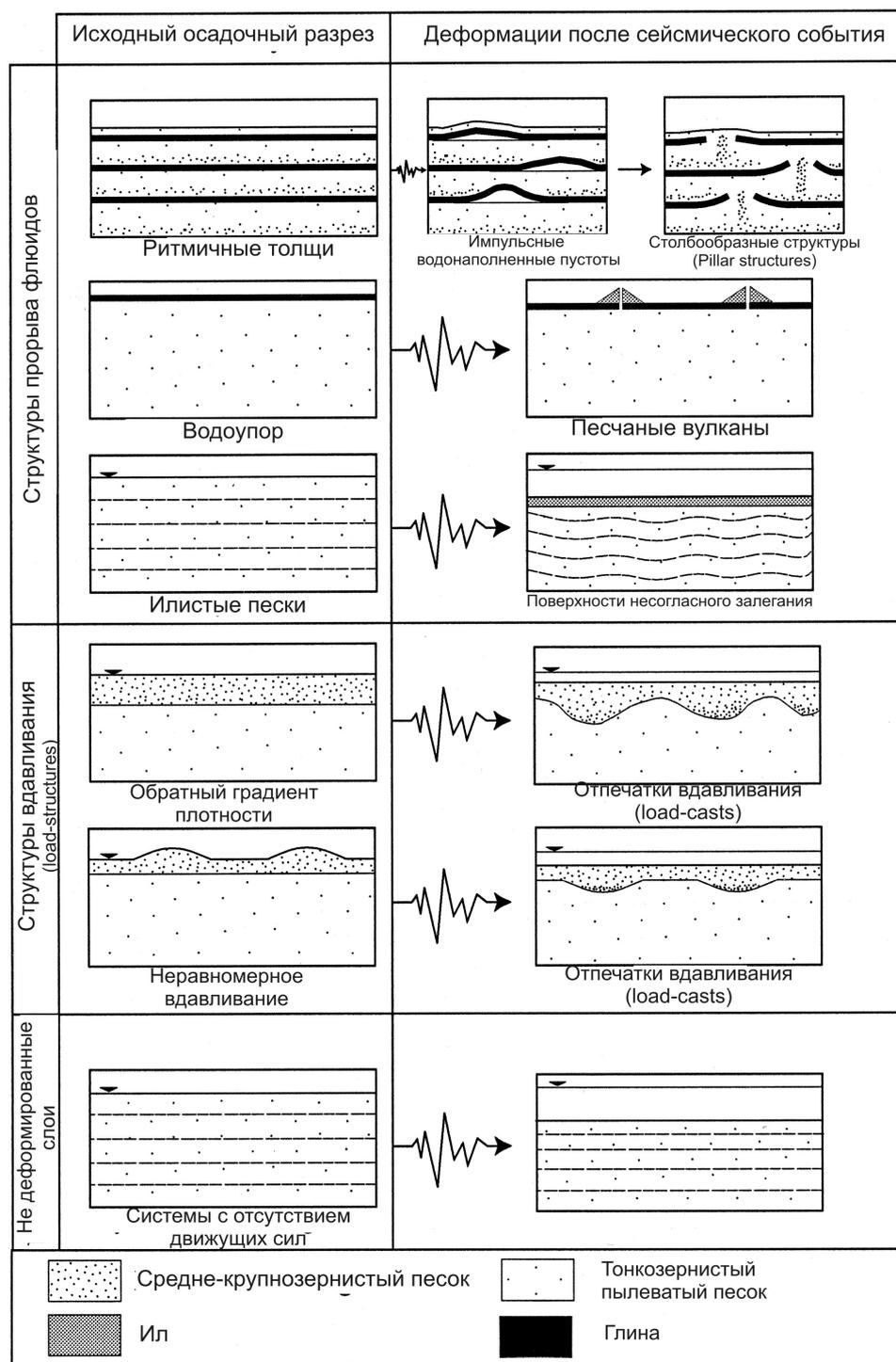


Рис. 5. Основные типы сейсмогенных деформационных структур, образуемых в рыхлых отложениях, по [Moretti et al., 1999]. Слева – исходные геологические разрезы, справа – признаки (деформации) разжижения и/или флюидизации после сейсмического события.

Fig. 5. Sketch of main kinds of reproduced soft-sediment deformation structures. On the left is the initial sedimentary column. On the right are the liquefaction and/or fluidization features after the seismic event, after [Moretti et al., 1999].

формационные структуры не наблюдались. Это позволило авторам подтвердить правомерность выделения в качестве сейсмиков верхних, уплотненных частей гомогенных тонкозернистых слоев в осадках озер Канады [Shilts, Clauge, 1992; Doig, 1998].

#### ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ СЕЙСМИКОВ НА ТЕРРИТОРИИ ЮГА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Сейсмикоты являются довольно распространенными дислокациями в областях с повышенной сейсмичностью, и, на первый взгляд, многообразие

форм их проявления во многом облегчает задачу исследователей, поскольку, как было показано выше, данные структуры могут проявляться на значительном удалении от плейстосейстовых зон в различных по составу отложениях. В то же время большинство из перечисленных структурных форм по своему внешнему виду имеют значительное сходство со следами проявления в осадочных слоях экзогенных процессов. Их примерами могут быть деформации, развивающиеся при гравитационном сползании осадочных масс, химическом выветривании горных пород, формировании флювиогляциальных отложений, криогенезе и т.д. [Obermeier, 1996], поэтому в любых физико-географических обстановках необходимо определять и доказывать генезис изучаемых структур. В настоящее время для отнесения наблюдаемых деформаций к сейсмогенным широко используются следующие типологические полевые критерии [Sims, 1975; Корженков, 2006]: 1) местонахождение исследуемых деформаций в сейсмически активных областях; 2) подходящий состав осадков – слабоконсолидированные, метастабильные пески и глины с низким сцеплением; 3) сходство структур, образованных экспериментально, со структурами, образованными сейсмическими сотрясениями [Kuenen, 1958; Nichols et al., 1994], или со структурами, описанными где-либо как сейсмиды [Seilacher, 1969; Obermeier, 1996; Montenat et al., 2007; и др.]; 4) исключение возможности образования деформаций вследствие гравитационного течения; 5) расположение деформированного слоя в стратиграфическом «сэндвиче» из недеформированных слоев; 6) широкое латеральное простираание деформационных структур [Allen, 1986]; 7) циклическое повторение структур, возникающее в сейсмических зонах вследствие периодического проявления сильной сейсмической активности.

Очевидно, что перечисленные признаки в большей мере призваны помочь исследователям отделять сейсмиды от следов проявления гравитационных процессов и практически бесполезны в регионах, где проявлены деформации других типов. Как показывает анализ известной литературы, в этих случаях идентификация изучаемых дислокаций сталкивается со значительными трудностями, которые решаются различными исследователями на основе привлечения дополнительных критериев, указывающих на возможное сейсмогенное происхождение деформаций, и/или конкретизации перечисленных выше признаков [Obermeier, 1996; Obermeier et al., 2005; Vanneste et al., 1999; Fortuin, Dabrio, 2008; и др.].

Существенным фактором, затрудняющим сейсмогеологические исследования в Восточной Сибири, является широкое развитие мерзлотных процессов. Данная территория представляет собой область островного распространения многолетнемерзлых пород. В пределах ее наиболее сейсмически опасной части – впадин Байкальской рифтовой зоны, заполненных толщами кайнозойских отложений, характер залегания многолетнемерзлых пород имеет ряд особенностей. Согласно исследованиям

Ф.Н. Лещикова, Н.Е. Зарубина, О.В. Павлова и др., многолетнемерзлые породы имеют здесь большую мощность, прерывистое по площади и слоистое по глубине залегание [Инженерная геология..., 1968]. В верхнем слое выделяются многолетнемерзлые породы с островным и линзовидным характером залегания, мощность которых достигает десятков, а в отдельных впадинах – первых сотен метров. Распространение многолетнемерзлых пород, а также сезонное промерзание и оттаивание грунтов способствовали развитию различных мерзлотных процессов и явлений. Наиболее широко здесь развиты бугры пучения, термокарстовые озера, бугристо-западинные и трещинно-полигональные формы микрорельефа. Наличие погребенных слоев мерзлых пород, достигающих большой мощности, свидетельствует о том, что активные криогенные процессы сопровождали осадконакопление на протяжении позднекайнозойского этапа развития впадин Байкальского рифта [Инженерная геология..., 1968].

Все перечисленные факты свидетельствуют, что на территории Восточной Сибири, в силу климатических и геотектонических условий, возможно сочетание деформационных структур различных генетических типов – криогенного и сейсмогенного. До недавнего времени целенаправленно изучались только первые из них и, соответственно, практически все деформационные структуры в рыхлых отложениях характеризовались как криогенные. Поэтому главной проблемой при развертывании исследований сейсмидов в данных условиях является разработка надежных признаков и критериев выделения сейсмогенных деформаций в условиях криолитозоны.

Наработка таких критериев может быть осуществлена различными путями. Один из них заключается в проведении специализированных исследований в пределах эталонных для данной территории участков – эпицентральных зонах известных крупнейших землетрясений. Данный подход хорошо зарекомендовал себя в различных районах мира [Sims, 1975; Obermeier, 1996; Alfaro et al., 2001; Monecke et al., 2006; Reddy et al., 2009]. Он позволяет определить набор структурных форм сейсмидов, а также их основные параметры, характерные для условий конкретного региона, и, соответственно, в дальнейшем, при проведении площадных исследований, упростить их выделение на фоне следов других процессов. В Восточной Сибири подобными эталонами могут служить эпицентральные области катастрофических землетрясений XIX–XX вв., таких, как Цаганское (12.01.1862 г.), Среднебайкальское (29.08.1959 г.) и Мондинское (04.04.1950 г.). В зоне Цаганского землетрясения в 2009 г. были проведены рекогносцировочные работы (см. рис. 1, площадь 1), в ходе которых были вскрыты и охарактеризованы разнообразные по форме вторичные сейсмогенные дислокации, например инъекционные песчаные дайки (рис. 6) [Лунина и др., 2009]. Это дает основание полагать, что одним из результатов развития и детализации исследований на данном участке будет набор эталонных форм сейсмидов и характеристика их взаимоотношений с мерзлотны-

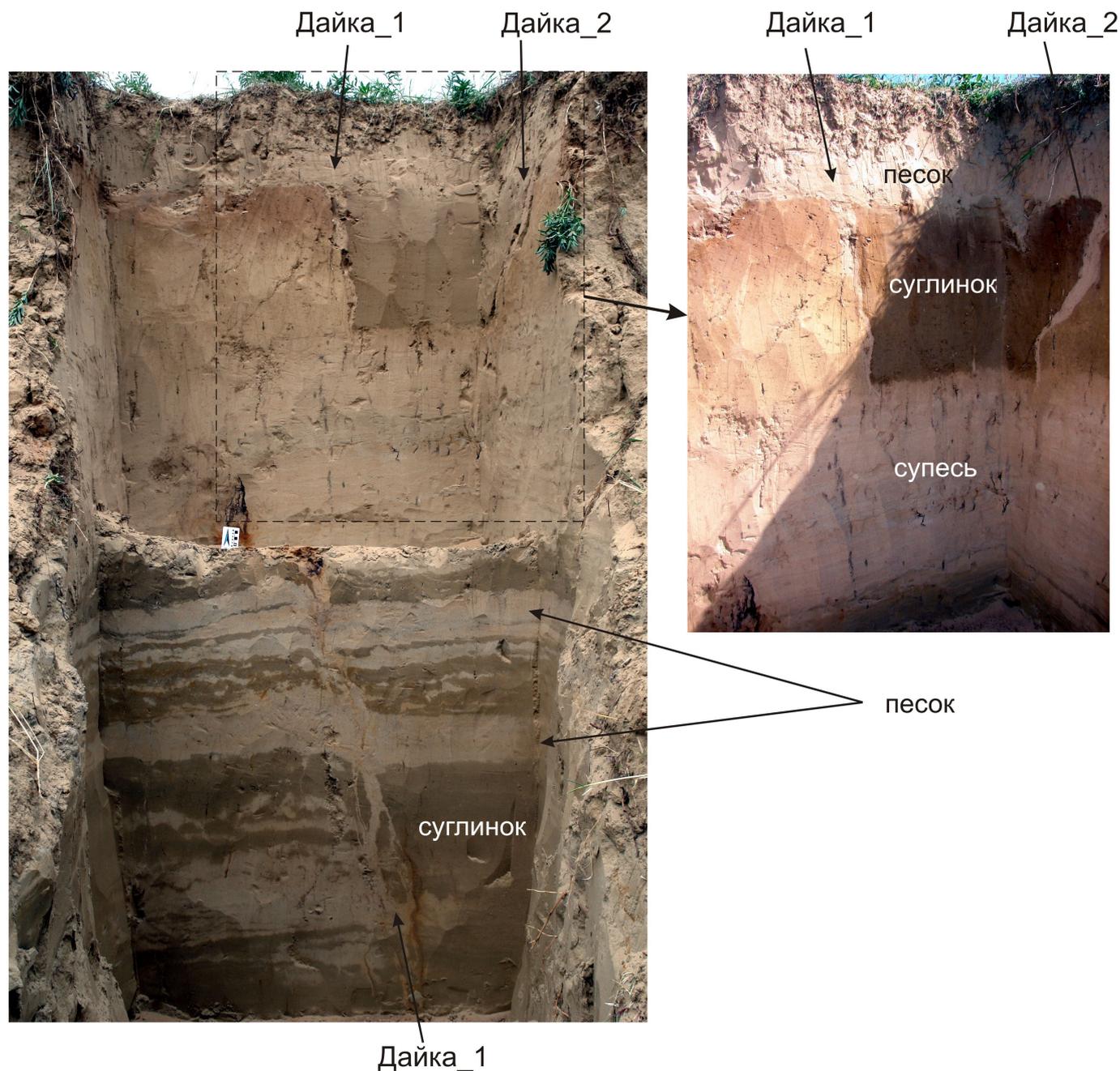


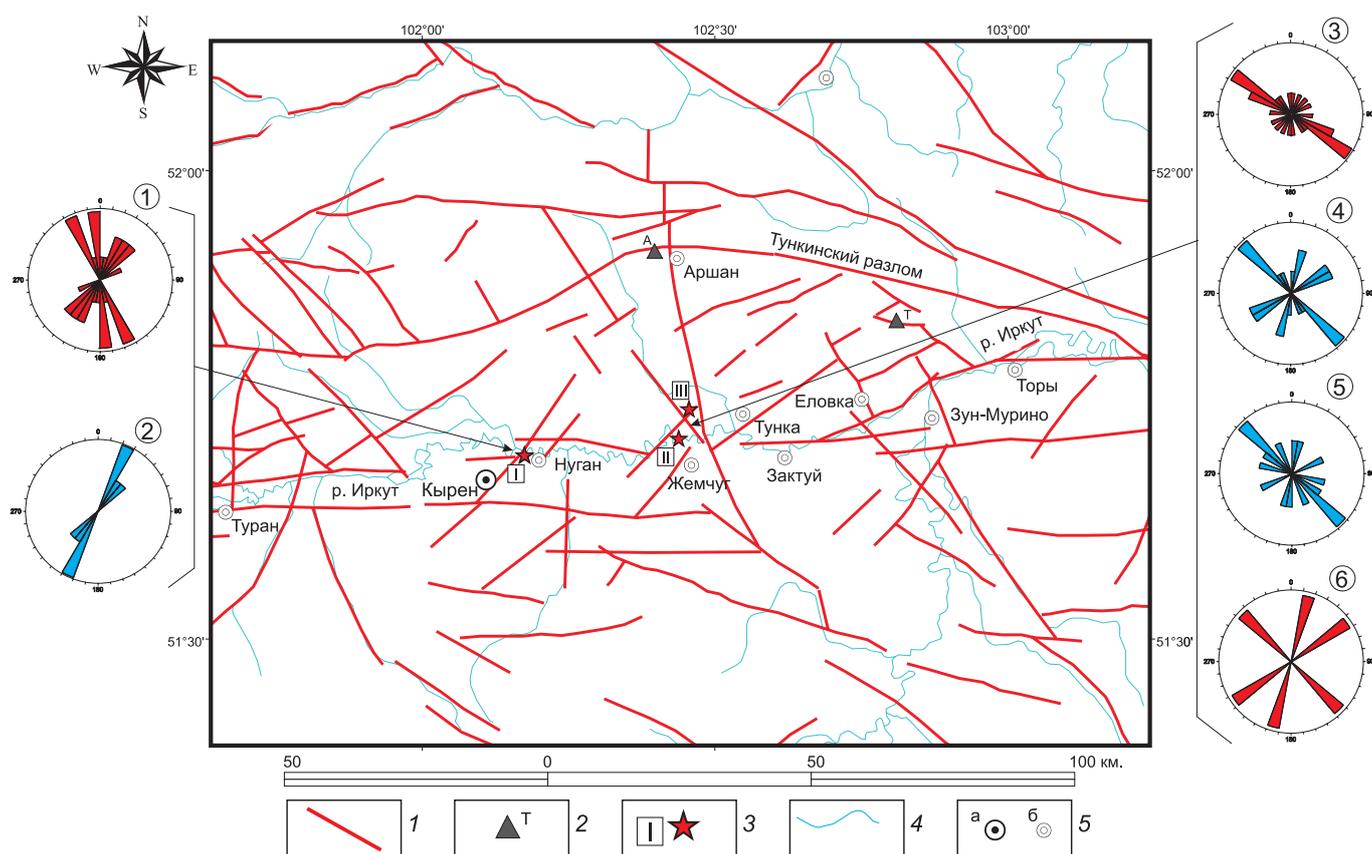
Рис. 6. Сейсмогенные инъекционные песчаные дайки в разрезе рыхлых отложений между пос. Инкино и Дубинино. Эпицентральная зона Цаганского землетрясения (12.01.1862 г.).

Fig. 6. Seismogenic injected sand dykes in the section of soft sediments located between the Inkiino and Dubinino settlements. Epicentral zone of the Tsagan sky earthquake (12 January 1862).

ми структурами.

Учитывая значительный размер изучаемых территорий, отдельные площади которых могут заметно отличаться по составам и свойствам грунтов, степени диагенеза осадков, их обводненности и по другим факторам от эталонных эпицентральных зон, следует признать необходимость второго пути по разработке критериев для идентификации сейсмиков. Данный путь заключается в адаптации к местным условиям ряда косвенных признаков, которые используются в мировой практике. Они, как

правило, уточняют и дополняют перечисленные выше семь типологических критериев. В своих работах мы учитывали следующие из них: 1) в наблюдаемых структурах должны присутствовать элементы, указывающие на наличие вертикальных (к земной поверхности) гидравлических сил [Obermeier, 1996]; 2) деформационные структуры должны быть проявлены на значительной площади, причем интенсивность их проявления должна возрастать от периферии к центральной части [Obermeier, 1996]; 3) деформации должны соответство-



**Рис. 7.** Расположение участков изучения деформационных структур в рыхлых отложениях в пределах Тункинской впадины и результаты измерений линейных структурных элементов (см. пояснения в тексте). 1 – активные разломы по [Лунина и др., 2010]; 2 – палеосейсмодислокации по [Чипизубов, 2007]: А – Аршанская, Т – Торская; 3 – участки исследований и их номера; 4 – гидросеть; 5 – районный центр (а) и населенные пункты (б).

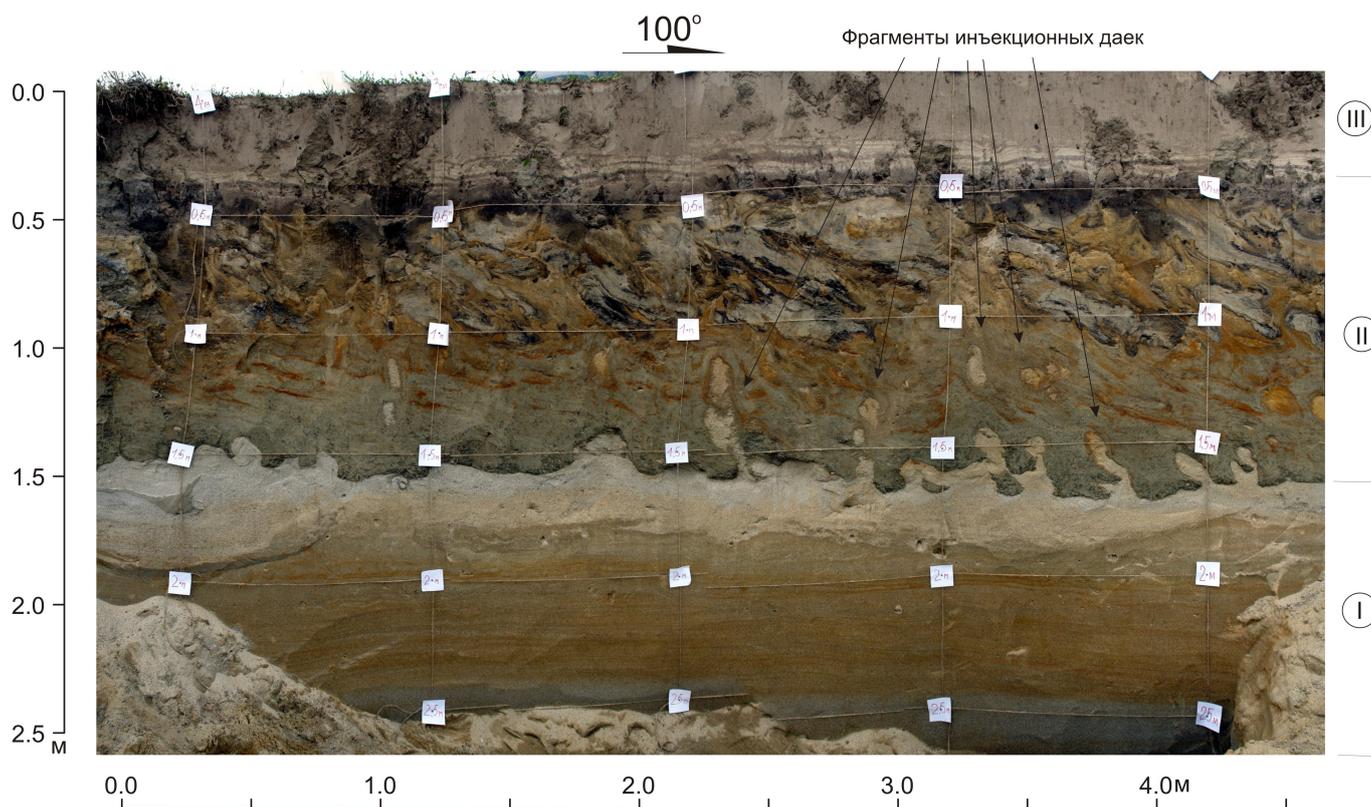
**Fig. 7.** Location of areas of studying deformational structure in soft sediments within the Tunka basin. Results of measurement of linear structural elements (see explanation in text). 1 – active faults according to [Лунина и др., 2010]; 2 – paleoseismodislocations according to [Чипизубов, 2007]: А – Arshan, Т – Tory; 3 – study areas and their numbers; 4 – rivers; 5 – district town (a) and other (b) settlements.

вать кратковременным эпизодам, разделенным долговременными интервалами стабильного состояния [Obermeier, 1996]; 4) наличие активных разломов и связанных с ними деформаций является косвенным свидетельством в пользу сейсмогенного происхождения структур в рыхлых отложениях [Van neste et al., 1999; Gladkov, Lunina, 2007].

В качестве иллюстрации использования данных критериев могут служить результаты наших исследований, выполненных в центральной части Тункинской впадины на удалении в несколько десятков километров от Аршанской и Торской палеосейсмодислокаций [Чипизубов, 2007] (см. рис. 1, площадь 2). Данная площадь характеризуется наличием большого количества разрезов, содержащих деформации в рыхлых отложениях. Все они расположены на значительном удалении от бортов впадины, что исключает влияние склоновых процессов, и, соответственно, наблюдаемые в них деформации могут иметь либо мерзлотное, либо сейсмогенное происхождение. При их изучении использовался методический комплекс, сочетающий приемы изучения деформационных структур в рыхлых отложениях и структурно-геологические методы. Для по-

следующего анализа полученных данных использовалась новая электронная карта активных разломов [Лунина и др., 2010].

Было изучено два участка интенсивного проявления деформаций в рыхлых отложениях (рис. 7): первый из них – на отрезке профиля п. Кырен – п. Нуган, второй – в районе пос. Жемчуг. Строение разрезов в пределах этих участков имеет сходные черты: в основании переслаивающиеся средне- и крупнозернистые пески, а верхние части разрезов сложены чередующимися отложениями тонкозернистых песков, суглинков (иногда глинами) и супесей, которые, в свою очередь, перекрываются почвенно-растительным слоем. Пример фотодокументации одного из разрезов, на правом берегу р. Иркут, вблизи пос. Нуган (участок I на рис. 7), вскрытого на глубину 2.5 м, приведен на рис. 8. Различия между изученными разрезами заключаются в изменении мощности существенно песчаной и/или существенно тонкозернистой частей разрезов, а также в порядке переслаивания супесчаных и суглинистых образований. Все зафиксированные деформации охватывают приповерхностные тонкозернистые отложения и, частично, верхнюю часть



**Рис. 8.** Разрез на правом берегу р. Иркут у пос. Нуган. I – переслаивающиеся средне- и крупнозернистые пески; II – деформированные слои супесей и суглинков; III – недеформированные суглинки и супеси.

**Fig. 8.** Section on the right bank of the Irkut river near the Nugan settlement. I – stratifying medium- and large-grained sands; II – deformed layers of sandy loams and loams; III – non-deformed loams and sandy loams.

подстилающих песков (например, рис. 8), т.е. расположены в пределах деятельного слоя, подвергающегося ежегодному замерзанию и последующему оттаиванию.

Во всех изученных разрезах наблюдался широкий спектр деформационных структур, включающий различные по формам и размерам конволюции, складкообразные изгибы слоев, кластические и нептунические дайки разной мощности, клиновидные структуры, а также разноранговые сколовые и отрывные трещины. При рассмотрении вопроса о происхождении зафиксированных деформаций учитывались дополнительные признаки, перечисленные выше, которые показали следующее:

– Ряд деформационных структур имеет явные признаки проявления вертикально направленных гидравлических сил. Это инъекции (дайкообразные и пластические), отражающие внедрение (подъем) песчаного материала в вышележащие тонкозернистые отложения (рис. 8). Также при детальном изучении разреза вблизи пос. Жемчуг (участок II на рис. 7) было установлено, что одна из структур, ранее характеризующаяся как мерзлотный клин, в своем основании имеет кластическую дайку (рис. 9), что свидетельствует о ее изначально сейсмогенном генезисе.

– Изученные участки расположены в узлах пере-

сечения активных разломов (см. рис. 7): в первом случае – северо-восточной и субширотной ориентировок, а во втором – северо-западной, северо-восточной и субмеридиональной, соответственно.

– Имеются указания, что этапы формирования инъекционных структур чередуются с этапами криогенных деформаций. Об этом свидетельствуют фрагменты песчаных даек, разбитых и растащенных в процессе последующих криотурбаций (см. рис. 8), а также приведенный выше пример наложения мерзлотного клина на сейсмогенную дайку.

Таким образом, на данной площади присутствуют три из четырех дополнительных признаков сейсмогенного генезиса ряда структурных форм, причем для четвертого признака пока просто не хватает фактических данных и его действительность будет проверена при площадном расширении работ. В ходе дальнейшего анализа было рассмотрено пространственное положение следующих линейно ориентированных структурных элементов: шарниров складкообразных структур, простираний кластических и нептунических даек, а также ориентировок сколовых трещин со смещениями. Они позволяют получить характеристику направления действия сил, обусловивших формирование в рыхлых отложениях наблюдаемого ансамбля структур или его отдельных элементов.

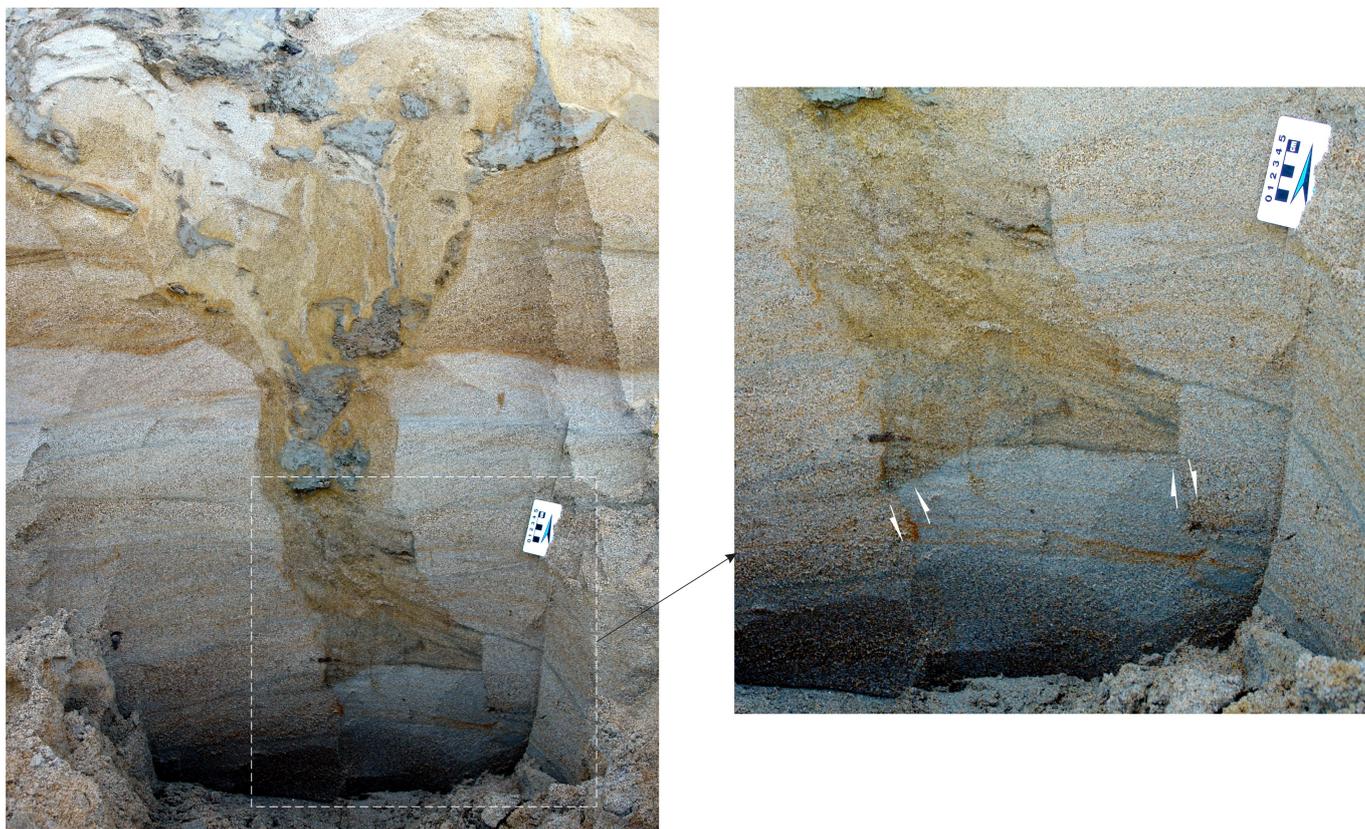


Рис. 9. Структура мерзлотного клина, наложенная на песчаную дайку (правый берег р. Иркут у пос. Жемчуг).

Fig. 9. Sand-volcano structure on the right bank of the Irkut river near the Zhemchug settlement.

Прежде всего необходимо отметить, что большая часть максимумов на розах-диаграммах простираения, построенных для того или иного типа структурного элемента, имеют ориентировки, близкие к направлениям активных разломов, проявленным на участках. Наиболее представительная информация получена для второго участка. Здесь в песчаном карьере на 9-м км дороги Тунка – Бадары и в береговых обнажениях р. Иркут зафиксированы структуры как растяжения (диаграммы 4 и 5 на рис. 7, соответствующие простираениям сбросовых трещин и даек), так и сжатия (диаграммы 3 и 6 на рис. 7, отвечающие направлениям взбросовых трещин и складкообразных изгибов слоев). Ориентировки большинства из перечисленных структурных элементов отвечают направлениям активных разломов (северо-восточное и северо-западное), пересекающихся в пределах данного участка. Особо необходимо отметить, что структурам сжатия, и растяжения присущи оба из указанных направлений. Знакопеременные смещения по разрывам одинаковых ориентировок и сочетание складкообразных деформаций с дайками указывают на проявление в толще рыхлых отложений циклически изменяющихся (за счет перемены мест осей сжатия и растяжения) сдвиговых напряжений, индуцированных землетрясениями [Obermeier et al., 2005]. Об импульсном характере подвижек свидетельствуют

размер сбросовых трещин в песчаном карьере и значительные амплитуды смещений по ним – до 18 см (рис. 10). Кроме того, характерным признаком сейсмогенного разжижения грунтов являются зафиксированные здесь своеобразные дислокации, представляющие собой внутри- и межслоевые мелкие трещины со ступенчатыми смещениями – структуры типа «fault-graded beds» [Seilacher, 1969], часто наследуемые кластическими микродайками (рис. 11).

Для участка Кырен – Нуган представительные данные были собраны только для шарниров складкообразных конволюций (диаграмма 1 на рис. 7) и сколовых трещин со сбросовыми смещениями (диаграмма 2 на рис. 7). На обеих представленных диаграммах присутствуют максимумы северо-восточной ориентировки, соответствующие одному из направлений активных разломов, образующих узел в пределах данного участка. Совпадение простираений линейно ориентированных структурных элементов, характерных для прямо противоположных обстановок (в одном случае – сжатие, в другом – растяжение), также указывает на наличие сейсмогенного парагенезиса в ансамбле деформационных структур в рыхлых отложениях.

Приведенный пример является иллюстрацией возможностей использования дополнительных признаков выделения вторичных сейсмогенных дисло-

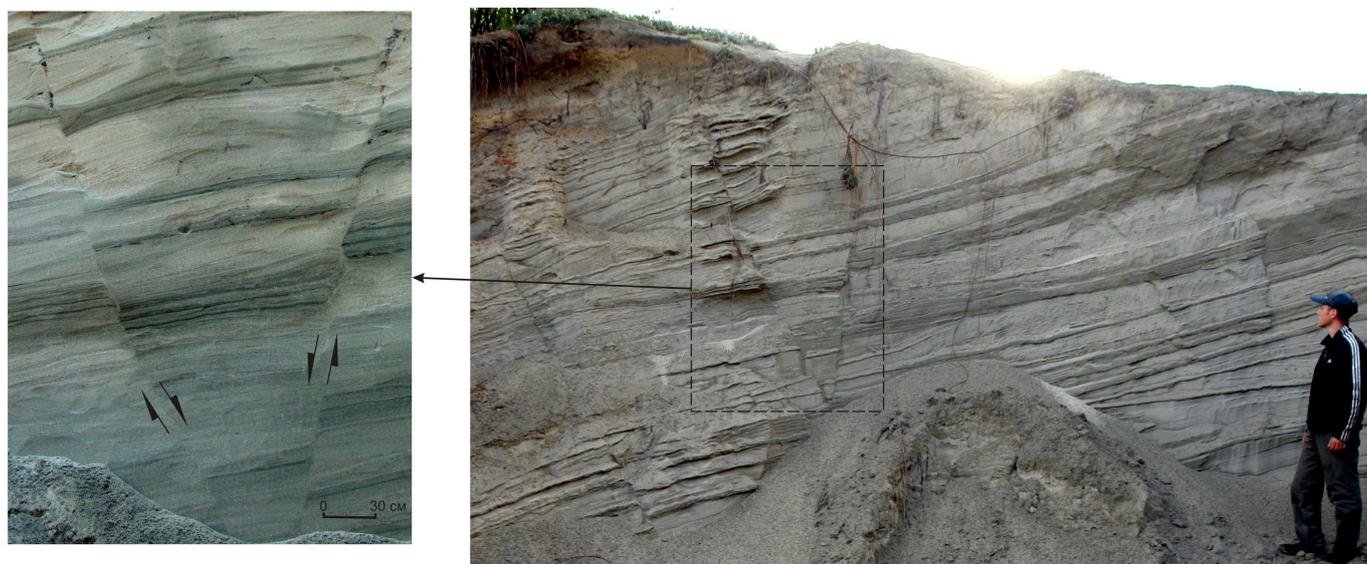


Рис. 10. Сбросовые трещины в песчаных отложениях (9-й км дороги Тунка – Бадары).

Fig. 10. Normal faults in sandy sediments (9 km of the Tunka – Badary road).

каций в сочетании с традиционными приемами структурного анализа. Полученные при этом результаты позволяют утверждать, что закономерно ориентированный по отношению к зонам активных разломов парагенезис структур, включающий склоновые трещины, кластические дайки и складкообразные конволюции, имеет сейсмогенное происхождение, и, следовательно, два последних его элемента представляют собой сейсмиды.

Однако наиболее эффективным, на наш взгляд, путем решения проблемы идентификации деформационных структур является их комплексное изучение специалистами в областях сейсмогеологии и мерзлотоведения. Подобное комплексирование работ позволит получить наиболее полные характеристики грунтовых условий территории, рассмотреть механизмы и порядок формирования деформационных структур, а также разработать модели

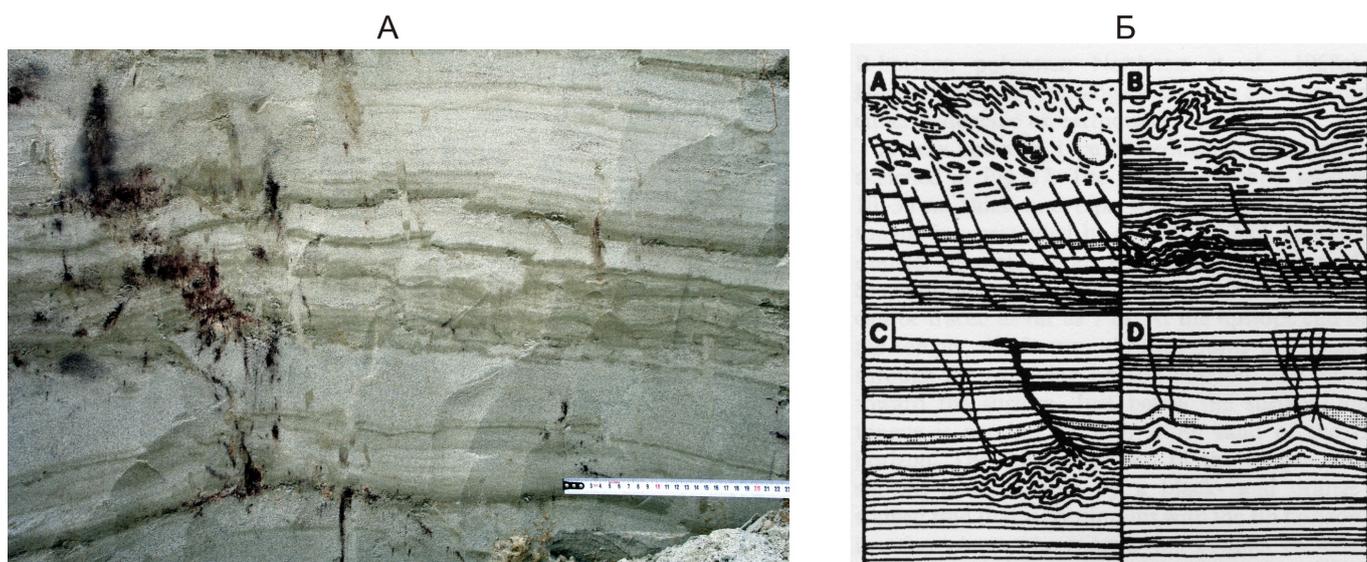


Рис. 11. Сочетание трещин и микродаек в изученном разрезе (А) и примеры структур типа «fault-graded beds» из работы С. Обермейера [Obermeier, 1996] (Б).

Fig. 11. Combination of fractures and micro-dykes in the investigated section (A), and examples of structures like «fault-graded beds» from Obermeier [1996] (B).

возможных сочетаний элементов структурных форм различного генезиса. Это даст возможность, помимо разработки надежных критериев выделения сейсмогенных дислокаций, определять взаимное влияние изучаемых процессов (в плане возможного усиления или ослабления интенсивности проявления деформаций) для внесения соответствующих поправок в дальнейшие оценки интенсивности палеоземлетрясений, получаемые на основе зависимостей, связывающих масштабность проявления сейсмитов с основными параметрами палеособытий.

В целом можно отметить, что представленный обзор работ, посвященных сейсмитам, а также результаты наших исследований в эпицентральной области Цаганского землетрясения на восточном берегу оз. Байкал и в Тункинской впадине свидетельствуют о том, что проблема выделения сейсмогенной составляющей деформационных структур в рыхлых отложениях, затронутых криогенными процессами, может успешно решаться, причем при региональных работах, охватывающих значительные площади с различными тектоническими режимами и особенностями строения чехла рыхлых отложений,

представляется логичным сочетать все перечисленные выше пути для наработки критериев выделения и изучения сейсмитов. Все это делает реальным широкомасштабное внедрение в практику сейсмогеологических исследований на территории Восточной Сибири работ по изучению вторичных сейсмогенных дислокаций вибрационного типа и открывает дополнительные перспективы для уточнения параметров известных, а также для выделения и оценки не обнаруженных пока палеоземлетрясений.

#### ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗУЧЕНИЯ СЕЙСМИТОВ И ИХ ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ЮГА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

В настоящее время основным направлением сейсмогеологических работ на территории Восточной Сибири является поиск и изучение первичных (сейсмогенных разрывов) и наиболее масштабных вторичных (сейсмооползни, сейсмообвалы и т.д.) современных и палеосейсмодислокаций, развитых в плейстосейстовых областях сильных землетрясений [Солоненко, 1988; Хромовских и др., 1993;

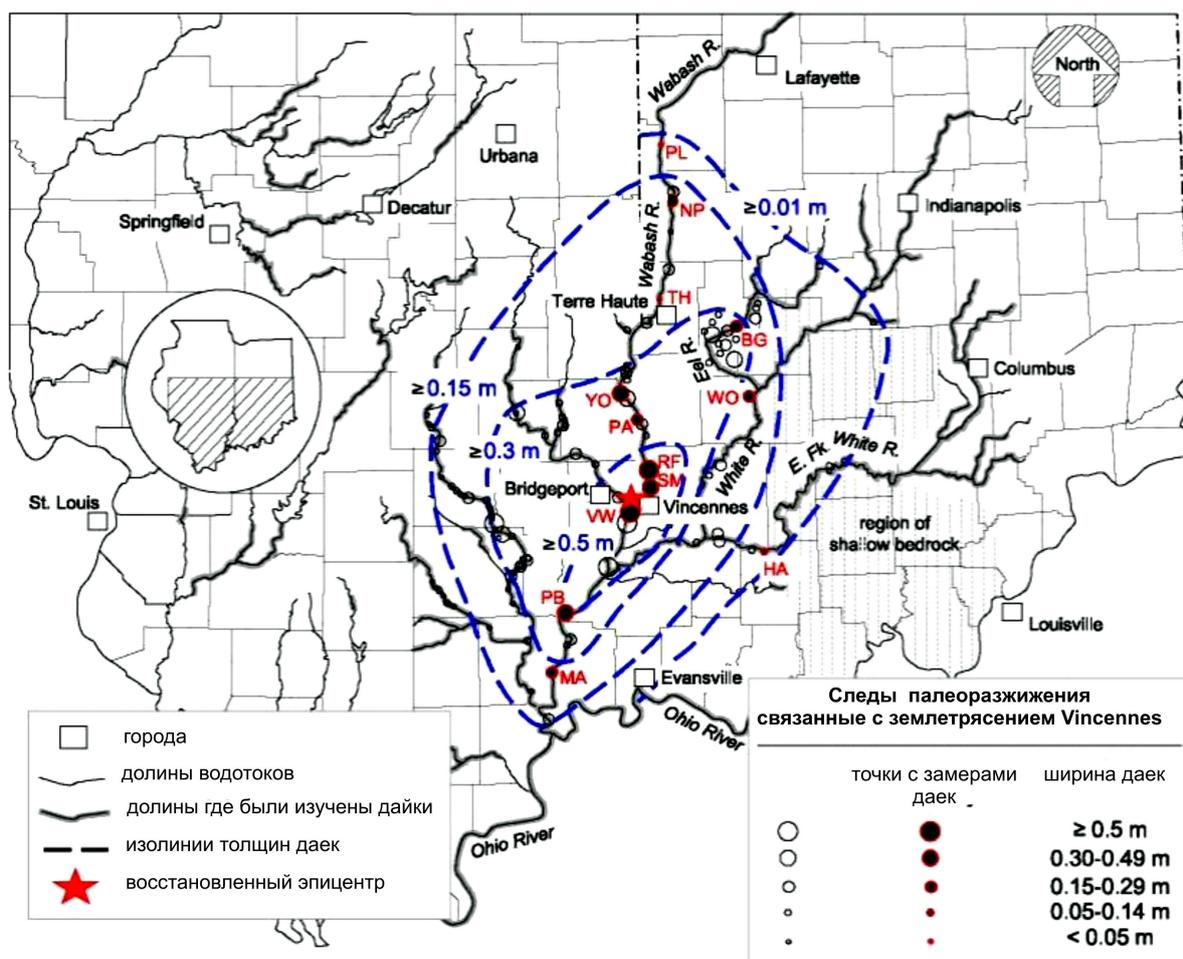
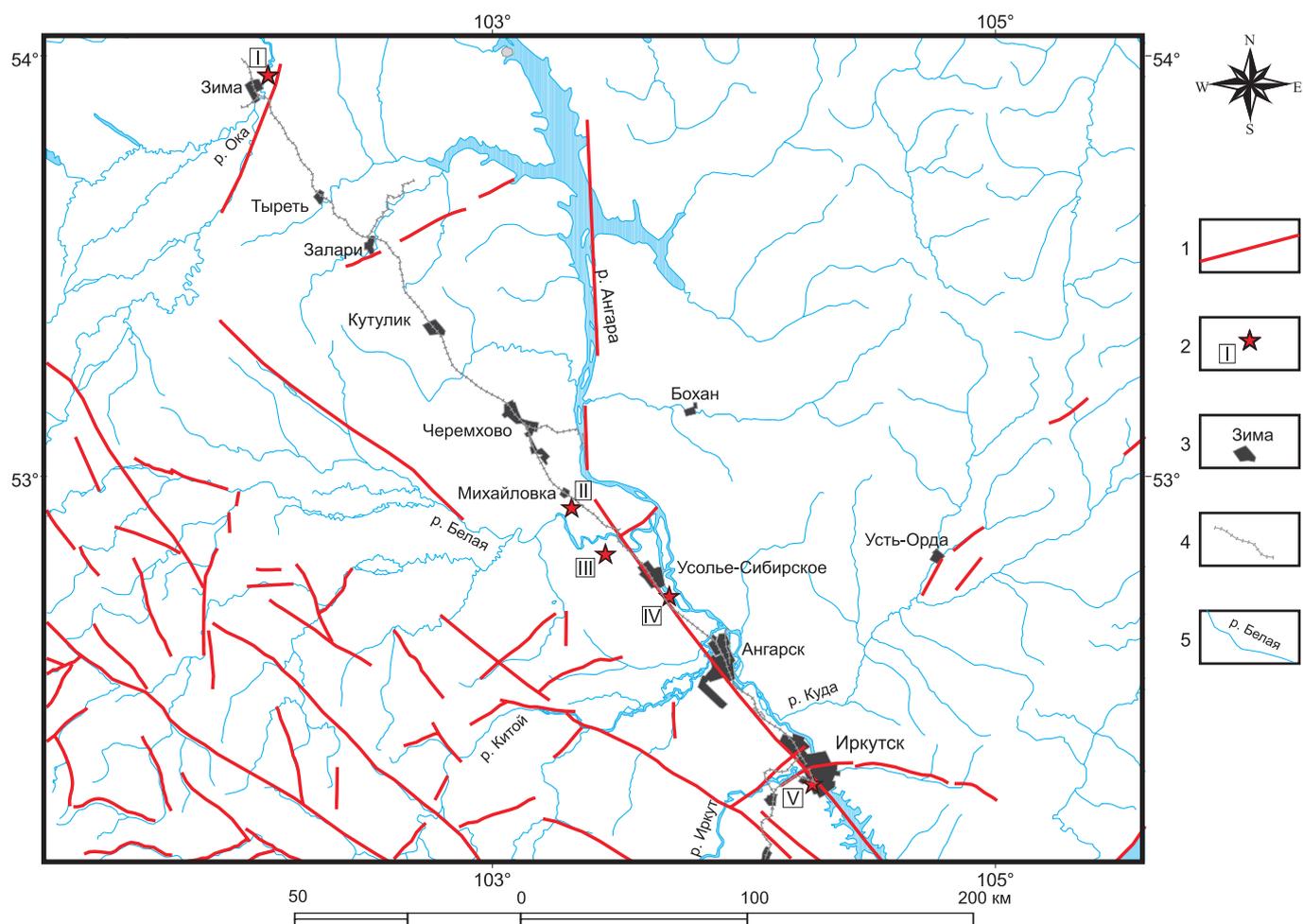


Рис. 12. Схема развития сейсмитов (песчаные дайки) в долине р. Вабаш, по [Green et al., 2005].

Fig. 12. Map of paleoliquefaction sites in the Wabash Valley after [Green et al., 2005].



**Рис. 13.** Расположение участков на юге Сибирской платформы, в пределах которых выявлены разрезы, содержащие сейсмиды. 1 – активные разломы, по [Лунина и др., 2010]; 2 – участки проявления сейсмидов и их номера; 3 – населенные пункты и их названия; 4 – железная дорога; 5 – гидросеть.

**Fig. 13.** Location of areas in the southern part of the Siberian platform, wherein sections containing seismites are revealed. Legend: 1 – active faults [according to Лунина и др., 2010]; 2 – areas with seismites and their numbers; 3 – settlements and their names; 4 – railroad; 5 – rivers.

Чипизубов, 2007; и др.]. Их картирование позволяет оценить максимальную возможную магнитуду ожидаемых землетрясений и период их повторяемости. Эти данные используются для реконструкции долговременного сейсмического режима, а также для построения карт зон возникновения очагов землетрясений (зон ВОЗ) и карт сейсмического районирования, необходимых для правильной оценки сейсмической опасности и снижения сейсмического риска той или иной территории. Включение в комплекс сейсмогеологических исследований работ по изучению и датированию сейсмидов позволяет расширить круг решаемых задач, уточнить и детализировать карты, построенные на основе анализа палеосейсмодислокаций.

Информация, полученная при выявлении, датировании и изучении особенностей распределения сейсмидов во времени и в пространстве, может быть использована для уточнения/определения магнитуд известных событий, для выявления эпи-

центральных зон палеоземлетрясений (при отсутствии палеосейсмодислокаций), а также для оценки величин пиковых ускорений грунтов при палеоземлетрясениях. При решении первой задачи используются зависимости, связывающие расстояние от эпицентра (палеосейсмодислокации) до наиболее удаленных участков проявления синхронных ему сейсмидов с параметром магнитуды. Подобные зависимости получены для разных регионов мира [Kuribayashi, Tatsuoka, 1975; Galli, 2000; Papathanassiou et al., 2005; и др.]. Они показывают, что эффекты, связанные с разжижением грунтов, могут генерироваться землетрясениями с магнитудами ( $M_w$ ) от 4.2 и выше [Galli, 2000]. Однако наиболее распространенным порогом магнитуды ( $M_w$ ), при котором устойчиво формируются сейсмиды на больших площадях, считается 6.5 [Ambraseys, 1988; Obermeier et al., 2005]. В случаях, когда в грунтах преобладают крупно- и грубозернистые разности, порог магнитуды существенно повышается (до  $M_w=7$ ), при этом

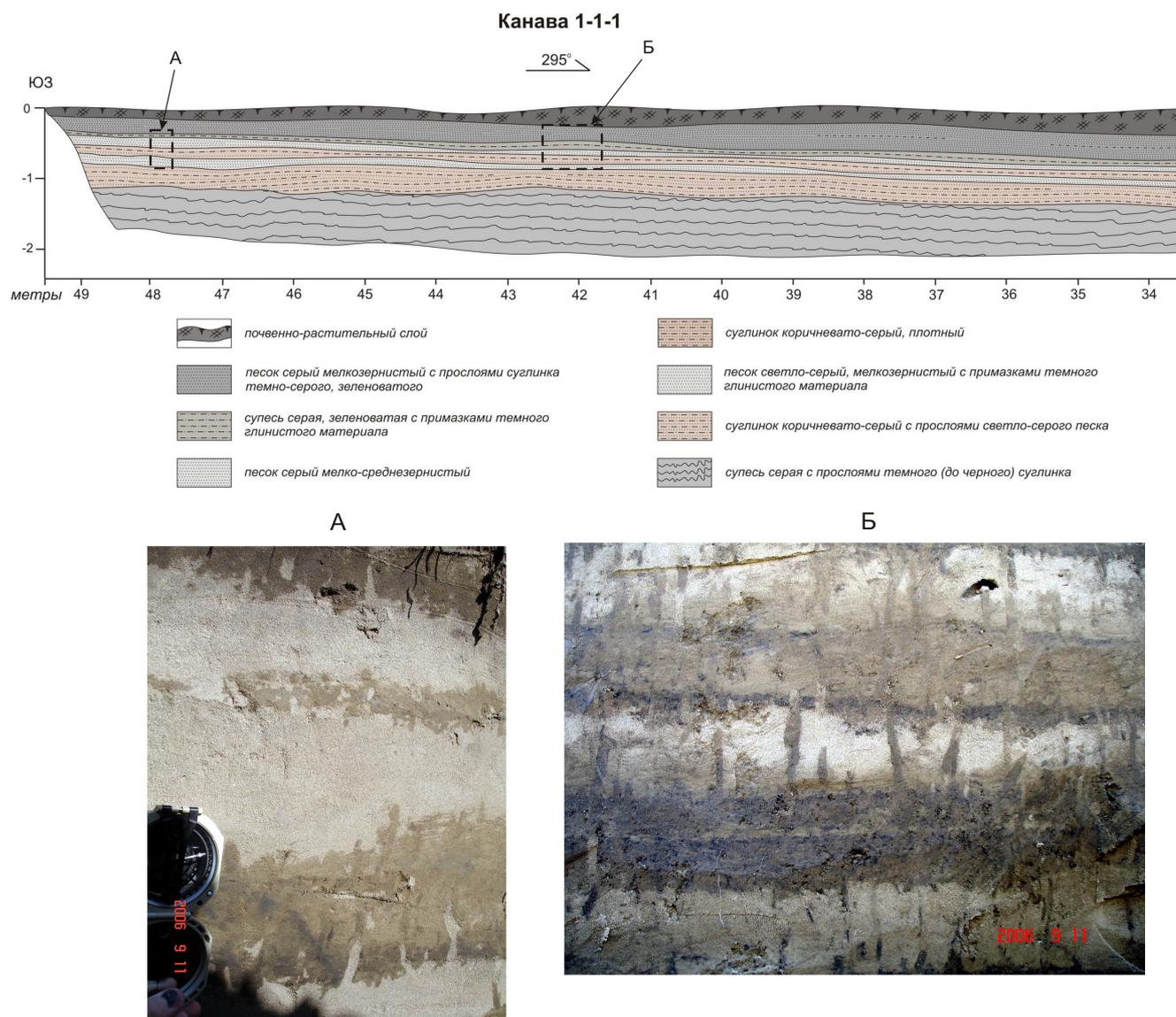


Рис. 14. Фрагменты документации канавы 1-1-1, пройденной на участке I. А, Б — микродайки с разнонаправленным перемещением выполняющего их материала.

Fig. 14. Fragments of documentation on Trench 1-1-1 in Area I. А, Б – micro-dykes with differently directed movement of their infill material.

максимальные расстояния от эпицентра, в пределах которых проявляются сейсмиды, колеблются от 50 км [Galli, 2000] до 130 км и более [Obermeier, 1996]. Необходимо стремиться к построению в ближайшем будущем подобных зависимостей для Восточной Сибири, а до этого времени следует пользоваться известными мировыми данными.

Выявление новых или подтверждение местона-

хождений предполагаемых палеосейсмодислокаций (back-analysis) возможно путем изучения распределения синхронных по времени сейсмидов на значительных (сотни км<sup>2</sup>) площадях [Obermeier et al., 2005], при этом для локализации района возможного/предполагаемого расположения сейсмодислокации (эпицентра) необходимы наблюдения сейсмидов как минимум в трех удаленных друг от друга

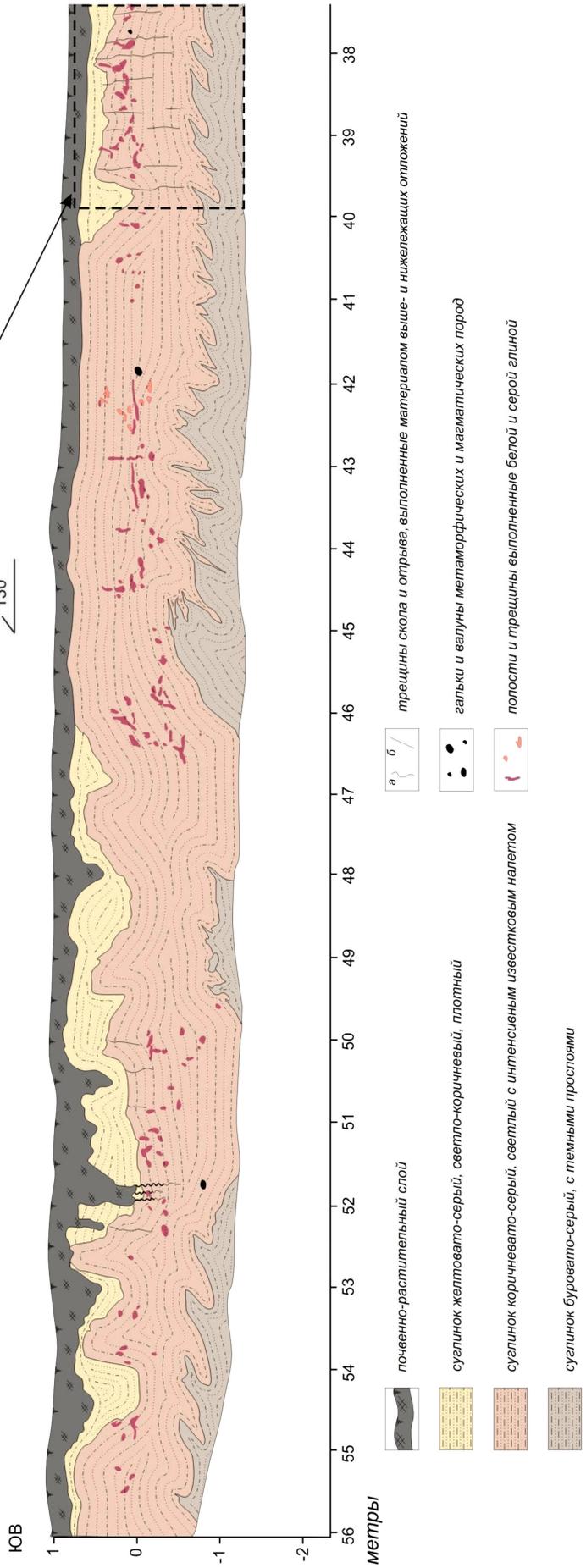
Рис. 15. Фрагмент документации канавы 10-1, пройденной на участке II.

Fig. 15. Fragment of documentation on Trench 10-1 in Area II.



Канавка 10-1

130°



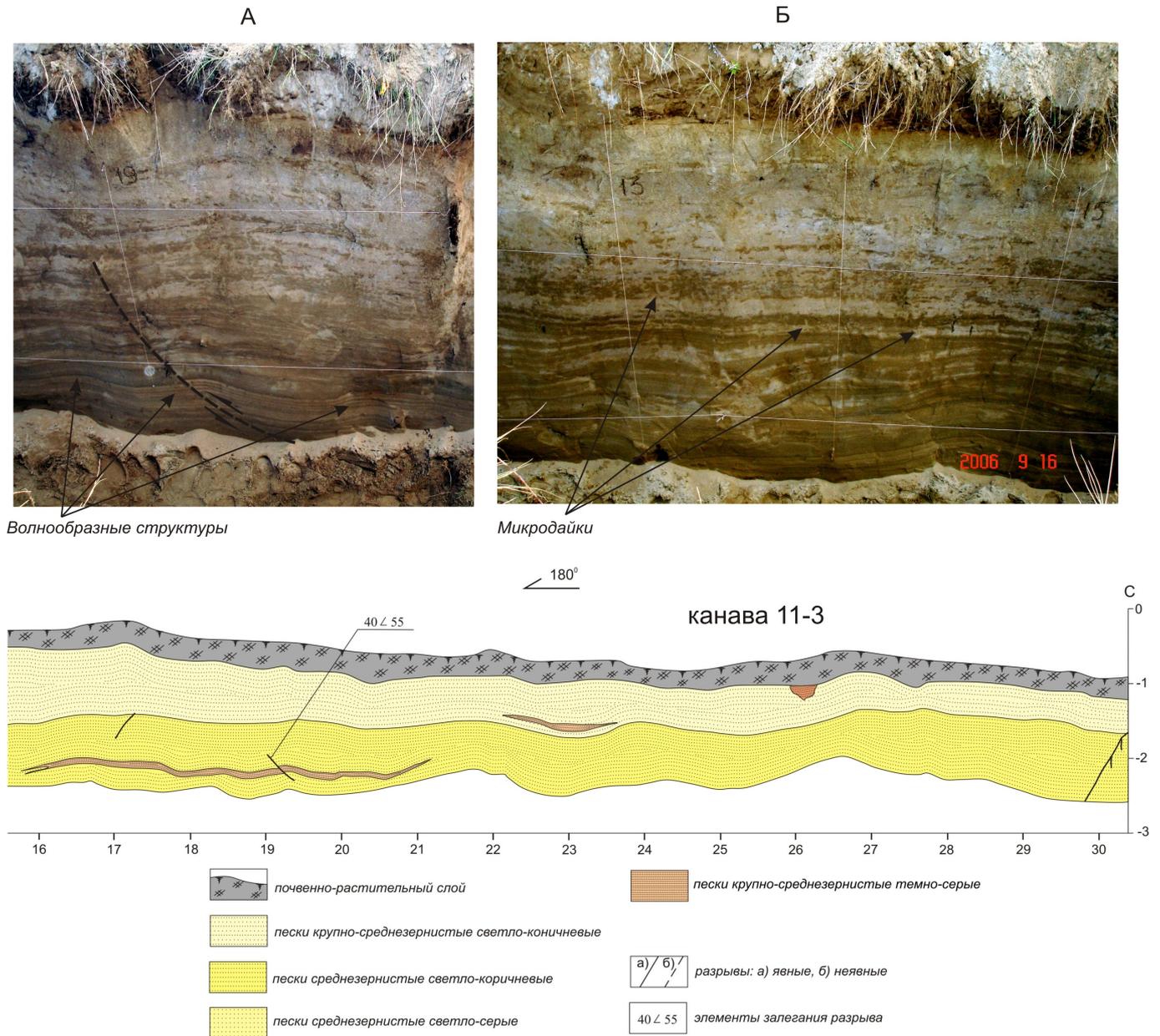


Рис. 16. Фрагмент документации канавы 11-3, пройденной на участке III. А – волнообразные структуры; Б – микродайки с разнонаправленным перемещением материала слоев.

Fig. 16. Fragments of documentation on Trench 11-3 in Area III. A – wave-structures; Б – micro-dykes with differently directed movement of their infill material.

точках наблюдения. Затем производится сопоставление интенсивности проявленных в точках деформационных форм, в совокупности с анализом пространственных ориентировок их структурных элементов (трещин растяжения для даек, шарниров и осей складкообразных и конволюционных структур), позволяющих восстановить линии (направления) действия сил, образуемых сейсмическими волнами. Можно предположить, что точки пересечения подобных линий, замеренные в разных местах, обозначают область эпицентра (подобная технология, но применительно к деформациям археологических памятников описана в работах А.М. Корженкова

[Корженков, 2006]). То же самое можно сказать относительно изолиний интенсивности проявления зафиксированных деформационных структур. В качестве интенсивности могут выступать различные параметры, характеризующие тот или иной тип сейсмиков. Как пример можно привести работы С. Обермейера и Р. Грина с соавторами [Green et al., 2005; Obermeier et al., 2005], в которых в качестве оценки интенсивности выступали параметры ширины (мощности) и глубины залегания верхних кромок песчаных даек в сейсмических зонах Нью-Мадрид и Вабаш (Северная Америка). Изолинии изменений этих величин, вкпе с результатами анализа ориен-



Рис. 17. Инъекционные структуры в карьере на участке IV.

Fig. 17. Injected structures in the quarry in Area IV.

тировок даек, позволяют достаточно уверенно оконтурить эпицентральной зону и выявить предполагаемый эпицентр события (рис. 12).

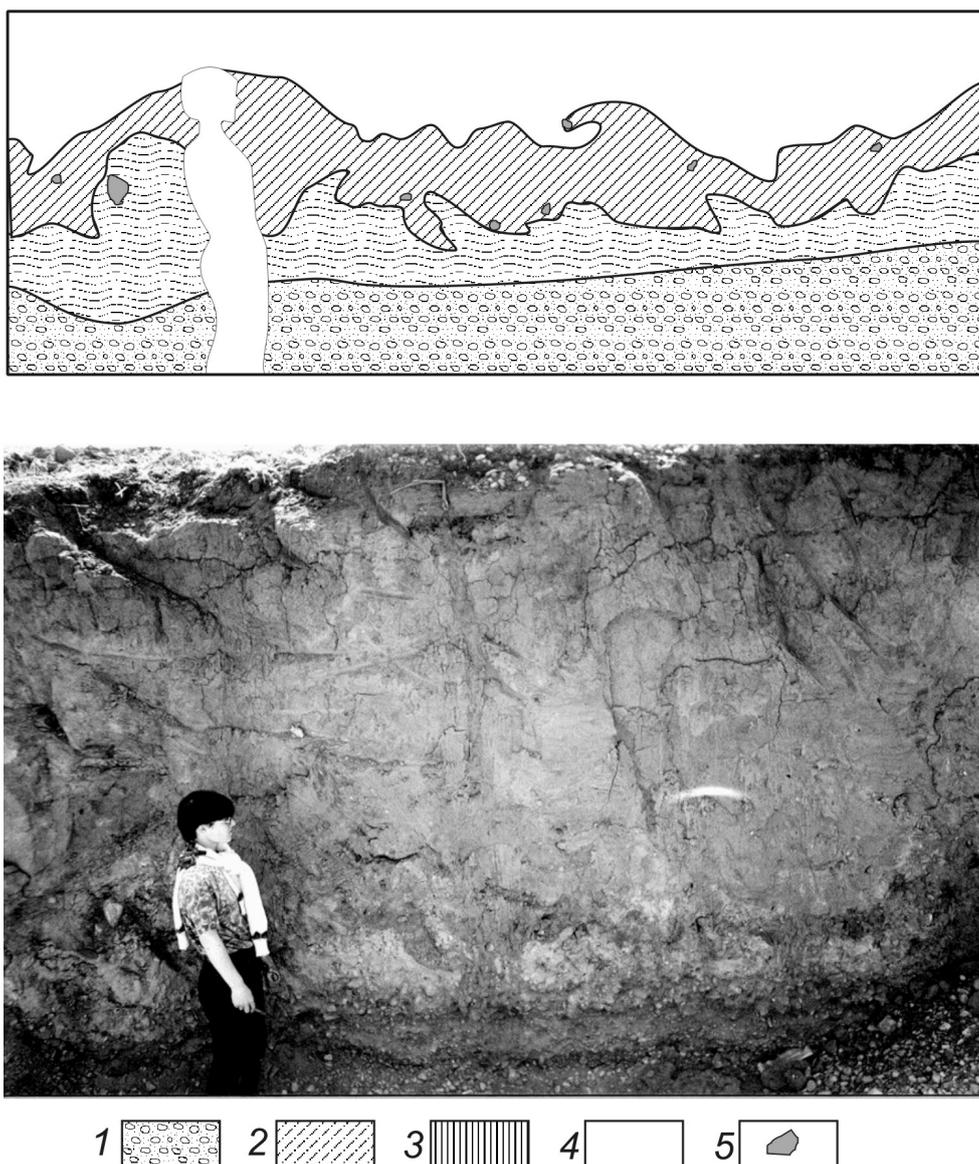
Особое значение сейсмиты имеют в качестве индикаторов для выявления участков потенциального усиления сейсмических эффектов. Таковыми могут быть зоны разломов и узлы пересечения разломов, а также площадки, в пределах которых наблюдаются аномально водонасыщенные грунты. Получаемые в ходе исследований данные позволяют дополнять существующие разномасштабные карты сейсмораионирования и строить специализированные схемы в комплектах карт, направленных на оценку сейсмической опасности территорий [Anderson et al., 1994; McCalpin, Solomon, 2001; Utah Geological Survey, 2003]. Кроме того, активно развиваются исследования, направленные на изучение зависимости интенсивности проявления сейсмиков с пиковыми ускорениями, имевшими место в грунтах при землетрясениях [Obermeier, 1996]. В целом, приведенный обзор показывает, что постановка широкомасштабных работ по изучению сейсмиков на территории Восточной Сибири может помочь вывести сейсмогеологические исследования на уровень, сопоставимый с мировым.

Использование подходов, изложенных выше, позволило даже в условиях существенного дефицита

площадных данных получить новые результаты, касающиеся оценки сейсмической опасности юга Сибирской платформы. Здесь на профиле Иркутск – Зима (см. рис. 1, площадь 3) было выделено несколько разрезов, содержащих сейсмиты (рис. 13).

В пределах первого из них (участок I на рис. 13), расположенного на левом берегу р. Оки, в 1.5 км к востоку от п. Ухтуй, канавой были вскрыты переслаивающиеся разноокрашенные пески, супеси и суглинки (рис. 14). Осадки залегают практически субгоризонтально, а контакты между слоями характеризуются слабой волнистостью. В разрезе отсутствуют мерзлотные деформации. Спокойное, в целом, залегание слоев осложняется наличием участков проявления многочисленных микродаек – трещин отрыва, выполненных материалом нарушаемых ими осадков (рис. 14, А, Б). При этом одна часть даек представлена инъекционными структурами, т.е. отрывающимися внедрением материала нижележащих слоев в вышележащие, а другая – нептуническими, т.е. заполненными отложениями вышележащих слоев. Подобное сочетание дислокаций, характеризующихся разнонаправленным движением материала, наглядно отражает их сейсмогенное происхождение.

Второй разрез (участок II на рис. 13) расположен в 1 км к югу от южной окраины пос. Михайловка на линии, продолжающей изгиб русла р. Белой. Фрагмент

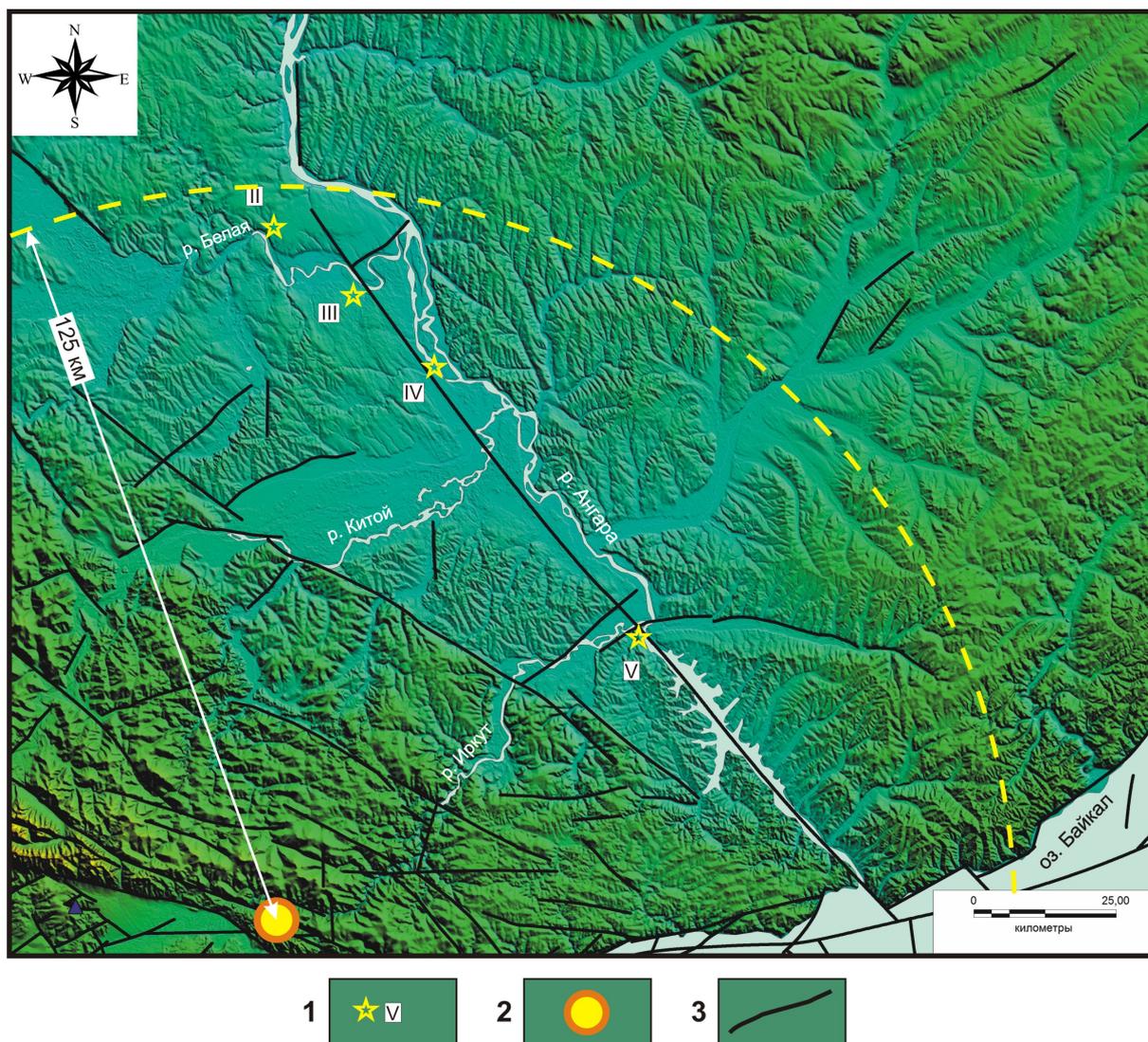


**Рис. 18.** Волнообразные структуры на контакте песчано-галечных отложений и суглинков в траншее у Старокузьмихинского коллектора. 1 – песчано-галечный горизонт; 2 – песчано-глинистый материал с галькой; 3 – суглинки, обогащенные песчаным и галечным материалом; 4 – суглинки; 5 – галька со следами вращения.

**Fig. 18.** Wave-structures at the contact between sandy-pebble sediments and loam in the trench at Starokuz'mikhinsky collector. 1 – sandy-pebbled layer; 2 – sand-shale material with pebble; 3 – loams enriched in sandy material; 4 – loams; 5 – pebble with rotation traces.

документации пройденной здесь канавы, представленный на рис. 15, показывает, что общее строение разреза определяют слои разноокрашенных суглинков. Сейсмита в его пределах также представлены микродайками с разнонаправленным движением выполняющих их вещества, которые характеризуются систематическим повторением форм и их наклона в приведенном разрезе. Генезис большинства других деформационных структур (пламеобразные внедрения темных суглинков в нижней части, складкообразные и структуры проваливания в верхней), которые наблюдаются в разрезе, трудно идентифицировать. Предположительно они являются результатом наложения сейсмо- и криогенных деформаций и поэтому в дальнейшем не рассматриваются.

Третий из обнаруженных разрезов находится в 4 км к востоку от пос. Сосновка на пересечении ЛЭП и автодороги Сосновка – Белореченск (участок III на рис. 13). На этом участке канавой были вскрыты отложения, представленные переслаиванием разнозернистых и разноцветных разновидностей песков (рис. 16). В стенках наблюдалось сочетание различных сейсмогенных дислокаций. Прежде всего, это волнообразные структуры (рис. 16, А). Дополнительным фактором, подтверждающим их сейсмогенное происхождение, служит наличие осложняющего одну из структур разрыва взбросового типа с амплитудой перемещения порядка 3 см. Наряду с этим, наблюдаются микродайки, подобные тем, что были описаны в предыдущих разрезах (рис. 16, Б), причем мак-



**Рис. 19.** Положение участков II – V, в пределах которых выявлены разрезы содержащие сейсмита по отношению к Восточно-Саянской палеосейсмодислокации. 1 – участки проявления сейсмита и их номера; 2 – Восточно-Саянская палеосейсмодислокация, по [Чилизубов, 2007]; 3 – активные разломы, по [Лунина и др., 2010].

**Fig. 19.** Location of Area II-V, wherein sections containing seismites are revealed, in relation to the East-Sayan paleoseismodislocation. 1 – areas with seismites and their numbers; 2 – the East-Sayan paleoseismodislocation [according to Чилизубов, 2007]; 3 – active faults [according to Лунина и др., 2010].

симальное их развитие наблюдается над положительными формами волновых структур. Такое сочетание характерно именно для сейсмита [Obermeier, 1996].

Четвертый изученный нами разрез расположен на левом берегу р. Ангары, в 300 м ниже по течению от устья р. Тельминка (участок IV на рис. 13) в заброшенном карьере, в котором ранее добывали песчано-галечную смесь. Его строение определяют следующие отложения (сверху – вниз): 0–3 м – суглинок желтовато-серый, плотный с прослоями супесчаного материала; 3–6 м – песчано-галечные аллювиальные отложения; 6.0–6.7 м – песчаный желтовато-серый, среднезернистый, плитчатый, выветрелый. Деформационные структуры развиты преимущественно в пределах суглинков и представляют

собой инъекционные (с затягиванием песчано-гравийного материала вверх по разрезу) и нептунические дайки мощностью до 5–10 см (рис. 17). На их сейсмогенный генезис указывает тесный парагенезис с трещиноватостью в нижележащем галечном слое. Обращает на себя внимание высокая нарушенность галечников: большая часть крупных галек рассечена трещинами, иногда сразу двумя или тремя, то есть интенсивность зафиксированных у Тельмы деформаций идентична таковым, происходящим при подвижках по крупным разрывным нарушениям.

И, наконец, перечисленные выше критерии позволяют отнести к сеймитам деформации, которые были зафиксированы нами еще в 2001 г. на территории г. Иркутска в районе Старокузьмixinского

коллектора (участок V на рис. 13). Они представлены складко- и волнообразными структурами в приконтактовом слое суглинка над песчано-галечной толщей (рис. 18). На момент изучения они были условно отнесены к криогенным дислокациям, однако уже тогда было высказано предположение об их возможном сейсмогенном происхождении [Гладков и др., 2000]. Определяющим фактором при этом является их отчетливая парагенетическая связь с расположенным в 100 м к востоку разрывным нарушением взбросового типа, амплитуда которого составляет десятки сантиметров. Кроме того, слой, в котором развиты подобные деформации, представляет собой грязно-серый вязкий суглинок с включениями гальки и песчаного материала, образованный в результате перемешивания песчано-галечных отложений и перекрывающих их желтоватых суглинков, и интерпретируется нами как проявление флюидизации.

Все участки, в пределах которых обнаружены сейсмиды, тяготеют к зонам активных разломов (рис. 13, 19), о чем свидетельствуют проявления на изученных участках разноранговых разрывов со смещениями как в коренных, так и в рыхлых аллювиальных отложениях, а также расколов галечного материала. Предполагается, что эпицентры землетрясений, которые обусловили формирование изученных сейсмидов, располагались вне пределов платформы, поэтому в большинстве своем наблюдаемые деформации отражают вариации сейсмических эффектов от так называемых транзитных (происходивших при движениях в Байкальской рифтовой зоне) землетрясений. По отношению к ним зоны платформенных разломов служат либо проводниками (усиление), либо экранами (ослабление) сейсмических волн.

Учитывая практически «точечный» характер полученных данных, мы в наших дальнейших построениях можем опираться только на следующие факты и предположения. Во-первых, налицо изменение относительной интенсивности проявления деформационных структур (сейсмидов) от северо-западного окончания профиля к юго-востоку (от микродаек на участках II и III до более масштабных инъекций и волн на участках IV и V, рис. 19). Во-вторых, на участке III была получена радиоуглеродная датировка деформированного гумусированного слоя, равная 4210 лет. Определение остаточной активности углерода выполнено Л.А. Орловой на счетчике QUANTULUS (Liquid Scintillation Counters) в лаборатории геологии и палеоклиматологии кайнозоя Института геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск). Для расчета возраста использован период полураспада  $^{14}\text{C}$ , равный 5570 лет. Возраст рассчитан от 1950 г.

Полученная датировка (4210 лет) наиболее близка (учитывая точность определений) по возрасту к одному из событий на палеосейсмодислокации Восточно-Саянская (4700 лет), которая, как предполагается, образовалась при землетрясении с  $M=7.6$  [Чипизубов, 2007]. Данная палеосейсмодислокация расположена в 107 км к югу от разреза на участке III (рис. 19). Известные зависимости [Galli, 2000; Pa-

pathanassiou et al., 2005], связывающие расстояния проявлений сейсмидов от эпицентра с магнитудой инициирующего их события, подтверждают возможную связь зафиксированных деформаций с Восточно-Саянской дислокацией. Они показывают, что при магнитуде 7.6 радиус площади распространения сейсмидов может достигать 125 км. Кроме того, по линии палеосейсмодислокации – участок проявления сейсмидов прослеживается ряд разломных сегментов, что может свидетельствовать о наличии зоны разлома субмеридиональной ориентировки – транзитной структуры, усиливающей проявление эффектов землетрясения на платформенной территории. Для остальных участков необходим подбор методов, позволяющих получить временные параметры сейсмогенных деформаций. Однако для некоторых из них (участки II, IV и V, рис. 19) нельзя исключать связи с Восточно-Саянской палеосейсмодислокацией, поскольку они расположены на расстояниях менее 125 км от данной структуры, а также потому, что выше было отмечено возрастание относительной интенсивности деформационных структур.

Безусловно, приведенные результаты представляют собой лишь «зачаточную» форму анализа, который может быть выполнен при широкомасштабных исследованиях на данной территории. В пользу необходимости постановки подобных работ свидетельствует наличие большого количества разрезов рыхлых отложений, содержащих пока не идентифицированные по генезису деформационные структуры.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На протяжении многих лет сейсмогеологические исследования в Восточной Сибири были ориентированы исключительно на выявление, вскрытие (тренинг) и документацию первичных и наиболее масштабных вторичных современных и палеосейсмодислокаций [Солоненко, 1988; Хромовских и др., 1993; Чипизубов, 2007]. Нимало не умаляя результативности и достоинств данного подхода, необходимо понимать, что дальнейшее продвижение вперед и повышение эффективности сейсмогеологических работ в данном регионе невозможны без расширения номенклатуры изучаемых сейсмогенных дислокаций и использования, в связи с этим, новых методических подходов к оценкам основных параметров сейсмогенных источников и образуемых ими эффектов. Сейсмиды являются дислокациями, изучение которых существенно расширяет возможности сейсмогеологического анализа (включая оценку места, возраста и энергетических характеристик неизвестных пока палеособытий).

Представленный в статье обзор научной литературы и результаты наших работ позволяют с оптимизмом смотреть на перспективы развития исследований, направленных на картирование и детальное изучение сейсмидов в голоценовых отложениях Восточной Сибири. Безусловно, при этом предстоит решить ряд непростых вопросов, связанных с учетом специфики проявления сейсмогенных дислока-

ций данного типа в условиях широкого развития мерзлотных процессов. Поэтому особое внимание необходимо уделить разработке и внедрению в практику сейсмогеологических исследований дополнительных (региональных) критериев, позволяющих разрабатывать структуры в рыхлых отложениях по их генезису.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 08-05-98110-р\_сибирь\_а, № 10-05-00072\_а и № 09-05-92421-КЭ\_а) и Совета по грантам Президента РФ (грант № МК-59.2009.5).

## ЛИТЕРАТУРА

- Вознесенский Е.А.* Землетрясения и динамика грунтов // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 2. – С. 101–108.
- Георгиевский Б.В.* Особенности неоднородных деформаций горных пород и их воздействие на динамику развития малых водохранилищ Восточно-Уральского плато // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. – 2008. – № 2. – С. 141–151.
- Георгиевский Б.В., Тевелев А.В.* Сейсмичность Южно-Уральского плато и геодинамические обстановки их образования // Новые идеи в науках о Земле. Секция общей и региональной геологии, стратиграфии, геотектоники, геодинамики: Материалы VIII международной конференции. – М.: РГГРУ, 2007. – С. 39–42.
- Гладков А.С., Лунина О.В.* Тектонические деформации в кайнозойских отложениях: особенности проявления и классификация // Проблемы современной сейсмогеологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии: Материалы совещания. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2007. Т. 1. – С. 97–98.
- Гладков А.С., Лунина О.В., Дзюба И.А., Орлова Л.А.* Новые данные о возрасте деформаций в рыхлых отложениях Тункинской рифтовой впадины // Доклады АН. – 2005. – Т. 405, № 2. – С. 229–232.
- Гладков А.С., Семинский К.Ж., Демьянович Н.И., Лунина О.В., Аржаникова А.В.* Признаки тектонической активности разломов на территории г. Иркутска // Сейсмическая опасность и воздействия: Тезисы международной научной конференции, посвященной памяти О.В. Павлова, Иркутск, 3–6 октября 2000 г. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – С. 8–9.
- Деев Е.В., Зольников И.Д., Гуськов С.А.* Сейсмичность в четвертичных отложениях Юго-Восточного Алтая // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50, № 6. – С. 703–722.
- Иванов П.П.* Грунты и основания гидротехнических сооружений. Механика грунтов. – М.: Высшая школа, 1991. – 447 с.
- Инженерная геология Прибайкалья / Под общ. ред. *Г.Б. Пальшина*. – М.: Наука, 1968. – 189 с.
- Ишихара К.* Поведение грунтов при землетрясениях. – СПб.: НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2006. – 384 с.
- Корженков А.М.* Сейсмогеология Тянь-Шаня (в пределах территории Кыргызстана и прилегающих районов). – Бишкек: Илим, 2006. – 290 с.
- Корженков А.М., Бауман Д., Омуралиев М., Хасельтон К.* Следы древних сильных землетрясений в отложениях озера Иссык-Куль // Известия русского географического общества. – 1999. – Т. 131, вып. 4. – С. 48–55.
- Лунина О.В., Гладков А.С., Андреев А.В.* Вторичные косейсмические деформации в четвертичных отложениях района дельты р. Селенги (Байкальская рифтовая зона) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 7. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2009. Т. 1. – С. 179–181.
- Лунина О.В., Гладков А.С., Орлова О.А.* Свидетельства палеосейсмических событий в рифтовых впадинах Прибайкалья и их возрастные привязки // Доклады АН. – 2009. – Т. 427, № 1. – С. 79–83.
- Лунина О.В., Гладков А.С., Шерстянкин П.П.* Новая электронная карта активных разломов юга Восточной Сибири // Доклады АН. – 2010 – Т. 433, № 5. – С. 662–667.
- Николаева С.Б.* Сейсмичность в позднеллюстоцен-голоценовых осадках северо-запада Кольского региона (северная часть Балтийского щита) // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50, № 7. – С. 830–839.
- Никонов А.А.* Сейсмодетекторы в рыхлых отложениях и их использование в палеосейсмологических реконструкциях // Проблемы современной сейсмогеологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии: Материалы совещания. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2007. Т. 2. – С. 54–59.
- Поволоцкая И.Э., Корженков А.М., Мамыров Э.М.* Следы сильных землетрясений в озерных осадках Кок-Мойнокской впадины (Северный Тянь-Шань) // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47, № 9. – С. 1024–1035.
- Рогожин Е.А.* Тектоника очаговых зон сильных землетрясений Северной Евразии конца XX столетия // Российский журнал наук о Земле. – 2000. – Т. 2, № 1. – С. 37–62.
- Солоненко В.П.* Палеосейсмогеология // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1973. – № 9. – С. 3–16.
- Солоненко В.П.* Инженерная сейсмогеология. Некоторые проблемы и задачи // Инженерная геология. – 1988. – № 1. – С. 3–14.
- Хромовских В.С., Чипизубов А.В., Смекалин О.П. и др.* Новые данные о палеосейсмодислокациях Байкальской рифтовой зоны // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1. – М.: ИФЗ РАН, 1993. – С. 256–264.
- Чипизубов А.В.* Оптимальная оценка сейсмической опасности Прибайкалья: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007. – 32 с.
- Alfaro P., Delgado J., Estevez A., Lopez-Casado C.* Paleoliquefaction in the Bajo Segura basin (eastern Betic Cordillera) // Acta Geologica Hispanica. – 2001. – V. 36, № 3–4. – P. 233–244.
- Allen J.R.L.* Earthquake magnitude-frequency, epicentral distance and soft sediment deformation in sedimentary basins // Sedimentary Geology. – 1986. – V. 43. – P. 67–75.
- Ambraseys N.* Engineering seismology // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. – 1988. – V. 17. – P. 1–105.
- Anderson L.R., Keaton J.R., Bay J.A.* Liquefaction potential map for the northern Wasatch Front, Utah, complete technical report: Utah Geological Survey Contract Report, 1994, 94-6, 150 p., 6 plates, scale 1:48,000 (<http://geology.utah.gov/maps/geo-hazmap/cache.htm>).
- Doig R.* Paleoseismological evidence from lake sediments for recent movement on the Denali and other faults, Yukon Territory, Canada // Tectonophysics. – 1998. – V. 296. – P. 363–370.
- Fortuin A.R., Dabrio C.J.* Evidence for Late Vessinian seismites, Nijar Basin, South-East Spain // Sedimentology. – 2008. – V. 55. – P. 1595–1622.
- Galli P.* New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction // Tectonophysics. – 2000. – V. 324. – P. 169–187.
- Green R.A., Obermeier S.F., Olson S.M.* Engineering geologic and geotechnical analysis of paleoseismic shaking using liquefaction effects: field examples // Engineering Geology. – 2005. – V. 76. – P. 263–293.
- Hempton M.R., Dewey J.F.* Earthquake-induced deformational structures in young lacustrine sediments, East-Anatolia Fault, South-east Turkey // Tectonophysics. – 1983. – V. 98. – P. 7–14.
- Kuenen P.H.* Experiments in geology // Trans. Geol. Soc. Glasgow. – 1958. – V. 23. – P. 1–28.
- Kuribayashi E., Tatsuoka F.* Brief review of liquefaction during earthquakes in Japan // Soils and Foundations. – 1975. – V. 15. – P. 81–92.
- Lowe D.R.* Water escape structures in coarse-grained sediments // Sedimentology. – 1975. – V. 22. – P. 157–204.
- McCalpin J.P., Solomon B.J.* Seismic-hazards mapping of the central Cache Valley, Utah – a digital pilot project: Final Technical Report, National Earthquake Hazards Reduction Program, Award No. 1434-HQ-98-GR-00024, Program Element I: Products for Earthquake Loss Reduction, 2001, 59 p., 12 plates, scale 1:24,000 (<http://geology.utah.gov/maps/geo-hazmap/cache.htm>).
- Moernaut J., Batist M., Heirman K., Daele M., Pino M., Brümmer R., Urrutia R.* Fluidization of buried mass-wasting deposits in lake sediments and its relevance for paleoseismology: Results from a reflection seismic study of lakes Villarrica and Calafquén (South-Central Chile) // Sedimentary Geology. – 2009. – V. 213. – P. 121–135.
- Monecke K., Anselmetti F.S., Becker A., Schnellmann M., Sturm M., Giardini D.* Earthquake-induced deformation structures in lake

- deposits: A Late Pleistocene to Holocene paleoseismic record for Central Switzerland // *Ecolgae Geologicae Helveticae*. – 2006. – V. 99. – P. 343–362
- Montenat C., Barrier P., d'Estevou P.O., Hibsich C. Seismites: An attempt at critical analysis and classification // *Sedimentary Geology*. – 2007. – V. 196. – P. 5–30.
- Moretti M., Alfaro P., Caselles O., Canas J.A. Modelling seismites with a digital shaking table // *Tectonophysics*. – 1999. – V. 304. – P. 369–383.
- Nichols R.J., Sparks R.S.J., Wilson C.J.N. Experimental studies of the fluidization of layered sediments and the formation of fluid escape structures // *Sedimentology*. – 1994. – V. 41. – P. 233–253.
- Obermeier S.F. Use liquefaction-induced features for paleoseismic analysis – An overview of how seismic liquefaction features can be distinguished from other features and how their regional distribution and properties of source sediment can be used to infer the location and strength of Holocen paleo-earthquakes // *Engineering Geology*. – 1996. – V. 44. – P. 1–76.
- Obermeier S.F. Liquefaction evidence for strong earthquakes of Holocene and latest Pleistocene ages in the states of Indiana and Illinois, USA // *Engineering Geology*. – 1998. – V. 50. – P. 227–254.
- Obermeier S.F., Olson S.M., Green R.A. Field occurrences of liquefaction-induced features: a primer for engineering geologic analysis of paleoseismic shaking // *Engineering Geology*. – 2005. – V. 76. – P. 209–234.
- Papathanassiou G., Pavlides S., Christaras B., Pitilakis K. Liquefaction case histories and empirical relations of earthquake magnitude versus distance from the boarder Aegean region // *Journal of Geodynamics*. – 2005. – V. 40. – P. 257–278.
- Reddy D.V., Nagabhushanam P., Kumar D., Sukhija B.S., Thomas P.J., Pandey A. K., Sahoo R.N., Prasad G.V. R., Datta K. The great 1950 Assam Earthquake revisited: Field evidences of liquefaction and search for paleoseismic events // *Tectonophysics*. – 2009. – V. 474. – P. 463–472.
- Seilacher A. Fault-graded beds interpreted as seismites // *Sedimentology*. – 1969. – V. 13. – P. 155–159.
- Shilts W.W., Claue J.J. Documentation of earthquake-induced disturbance of lake sediments using subbottom acoustic profiling // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 1992. – V. 29. – P. 1018–1042.
- Sims J.D. Determining earthquake recurrence intervals from deformational structures in young lacustrine sediments // *Tectonophysics*. – 1975. – V. 29. – P. 141–152.
- Vanneste K., Meghraoui M., Camelbeeck T. Late Quaternary earthquake-related soft-sediment deformation along the Belgian portion of the Feldbiss Fault, Lower Rhine Graben system // *Tectonophysics*. – 1999. – V. 309. – P. 57–79.
- Utah Geological Survey. Liquefaction potential map for Cache Valley, Cache County, Utah: Utah Geological Survey Public Information Series, 2003, 79, 2 p., 1 figure, approximate scale 1:166,700. (<http://geology.utah.gov/maps/geohazmap/cache.htm>).



**Гладков Андрей Станиславович**, канд. геол.-мин. наук, с. н. с.  
Институт земной коры СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия  
Тел. +7 89148852428; e-mail: gladkov@crust.irk.ru



**Gladkov, Andrey S.**, Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher  
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS  
664033, Irkutsk, Lermontov street, 128, Russia  
Tel. +7 89148852428; e-mail: gladkov@crust.irk.ru



**Лунина Оксана Викторовна**, канд. геол.-мин. наук, с. н. с.  
Институт земной коры СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия  
Тел. +7 89148852409; e-mail: lounina@crust.irk.ru

**Lunina, Oksana V.**, Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher  
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS  
664033, Irkutsk, Lermontov street, 128, Russia  
Tel. +7 89148852409; e-mail: lounina@crust.irk.ru