

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

ДИНАМИКА СМЕЩЕНИЙ ПО РАЗРЫВАМ В СТРУКТУРАХ РАСТЯЖЕНИЯ: ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Борняков С.А.

Старший научный сотрудник лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН.

г. Иркутск

Доцент кафедры динамической геологии геологического ф-та ИГУ. г.Иркутск

Каримова А.А.

Ведущий инженер лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН. г. Иркутск

Преподаватель кафедры динамической геологии геологического ф-та ИГУ. г.Иркутск

АННОТАЦИЯ. Выполнено физическое моделирование процессов формирования структур растяжения в упруговязкопластичных моделях с целью изучения динамики вертикальных смещений на составляющих их внутреннее строение разрывов. Установлено, что в ходе деформационной эволюции структур растяжения при общей тенденции увеличения суммарных амплитуд сбросовых смещений на разрывах их кратковременная динамика характеризуется колебательным поступательно-возвратным режимом. Такой режим обеспечивает периодическую реализацию на разрывах в условиях растяжения не только сбросовых, но и взбросовых смещений.

Ключевые слова: физическое моделирование, структуры растяжения, деформация, разрывы, амплитуда смещения.

ABSTRACT. Physical modeling of extension structures in elasticviscousplastic models were performed to study the dynamics of vertical displacements on normal fractures, composing their internal structure. It is established that during deformation evolution of extension structures general trend of increasing amplitude offsets on fracture exist, but their short-term dynamics of the offsets is characterized by vibrational forward-backward mode. The mode provides an implementation of the gaps in terms of stretching not only normal offsets, but also revers ones.

Keywords: physical modelling, structure stretching deformation, breaks, the amplitude of displacement.

Введение и новизна.

Структуры растяжения литосферы представлены крупными единичными грабенами или рифтами (например Рейнский грабен и др.) или совокупностью грабенов в пределах рифтовых зон (например Байкальская, Восточно-Африканская рифтовые зоны и др.). Их внутреннее строение, как правило, представлено центральным блоком, опущенным по системам обрамляющих его литострических сбросов [4]. Процесс сбросообразования в формирующихся современных рифтовых зонах сопровождается сейсмичностью. При восстановлении механизма очага землетрясений сейсмологи нередко сталкиваются с ситуацией, когда получают два равнозначных, но взаимоисключающих решения. Одно из них указывает на сбросовое смещение в очаге, тогда как другое, наоборот, на взбросовое. В таких ситуациях выбирают первое решение, логически соответствующее действующему региональному растяжению, поскольку реализация второго решения требует сжатия, возникновение которого в условиях рифтогенеза весьма проблематично. Тем не менее, известны случаи однозначного решения, указывающие на взбросовый механизм очага землетрясения [3]. Объяснение этого явления находят в транзитных импульсах сжатия, источник которых находится за пределами области рифтогенеза.

Для выяснения возможности реализации взбросовых смещений по разрывам в структурах растяжения в процессе деформационной эволюции авторами выполнено физическое моделирование

процессов их формирования. В такой целевой постановке физическое моделирование выполнено впервые.

Методика.

Условия подобия. Моделирование процессов формирования крупных разломных зон в литосфере проводится с использованием количественного критерия подобия для определения граничных условий эксперимента:

$$\eta / \rho g L T = \text{const}, \quad (1)$$

где η - вязкость, Па·с; ρ - плотность, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; L – линейные размеры, м; T – время, с. [2]. Этот критерий позволяет вычислить масштабные коэффициенты для каждого из использованных в нем физических параметров. При моделировании крупных разломов, соизмеримых по масштабу с межплитными границами принято использовать масштабные коэффициенты подобия вязкости $C_\eta \sim 10^{14-18}$, плотности $C_\rho \sim 1$, линейных размеров $C_L \sim 10^{5-6}$ и времени $C_t \sim 10^{9-13}$. При таких значениях коэффициентов подобия 1 мм в модели соответствует 100 м – 1 км в её природном аналоге, а 1 секунда эксперимента эквивалентна десяткам – миллиону лет природного процесса.

Модельный материал. Выбор модельного материала осуществлялся с учетом упруговязкопластичного поведения литосферы при длительно действующих на неё нагрузках [8]. В рамках временной длительности эксперимента при используемых скоростях нагружения моделей сходные с литосферой реологические свойства имеют водные

пасты глин. Нами выбрана водная паста монтмориллонитовой глины, правомерность использования которой в качестве модельного материала обоснована специально проведенным исследованием [5]. Её вязкость в проведенных экспериментах составляла 10^5 Pa·s, что соответствует вязкости литосферы 10^{20} Pa·s.

Экспериментальное оборудование, техника подготовки и проведения экспериментов. Эксперименты проводились на установке «Разлом», позволяющей воспроизводить в моделях процессы формирования зон разломов при растяжении, сжатии, сдвиге или их комбинациях, при скоростных режимах деформирования 10^{-5} , 10^{-4} и 10^{-3} м/с (рис.1).



Рисунок 1 - Общий вид установки "Разлом" для моделирования процессов разломообразования в упруго-вязкопластичных моделях литосферы

Модельный материал после инструментального контроля вязкости прибором ровным слоем размещался на двух штампах экспериментальной установки и деформировался при скоростях смещения подвижного штампа 10^{-5} или 10^{-4} м/с (рис. 2). Длина, ширина и толщина модели составляли 1м, 0,5м и 0,1м соответственно. Развивающийся в модели процесс фотографировался скоростной фотокамерой Basler "Basler" acA1920-40gm с частотой 1fp/s (1 кадр в секунду). Фотокамера ориентировалась перпендикулярно плоскостям сбросовых разрывов одного из двух крыльев формирующейся структуры растяжения. С полученных

фотографий вручную снимались замеры амплитуд накопленных вертикальных смещений по выбранному тестовым разрывам в программе CoralDRAW (Рис.3). Для снижения влияния возможных ошибок измерения на результаты, временные ряды собранных данных усреднялись скользящим окном по три значения со сдвигом на одно значение. После усреднения рассчитывалось приращение амплитуды смещения за единичный интервал времени (в нашем случае 1 секунда), путём определения разницы между текущим и предыдущим её значением.

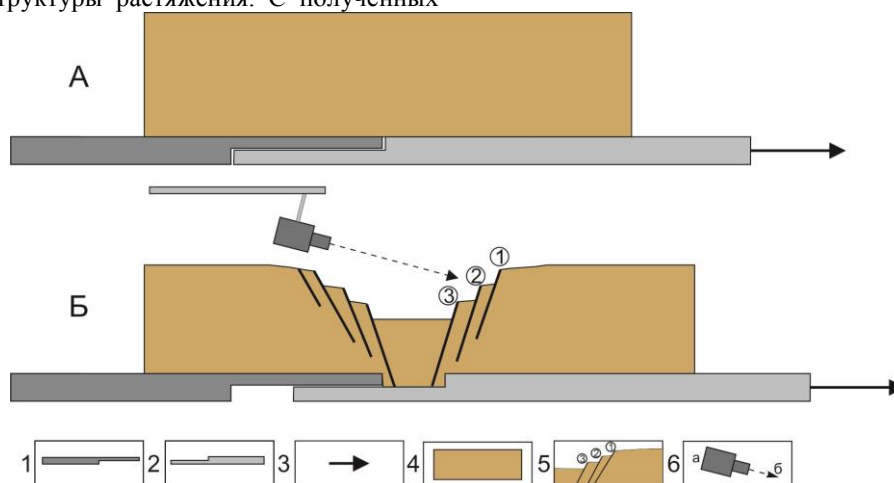


Рисунок 2

Схема деформирования модели (А) и формирующейся в ней структуры растяжения (Б) (вид сбоку). Условные обозначения: 1 – неподвижный и 2- подвижный штампы экспериментальной установки и 3 – направление перемещения подвижного штампа; 4 – модель; 5 – разрывы и их порядковые номера по временной последовательности образования; 6 – фотокамера (а) и направление съемки (б).

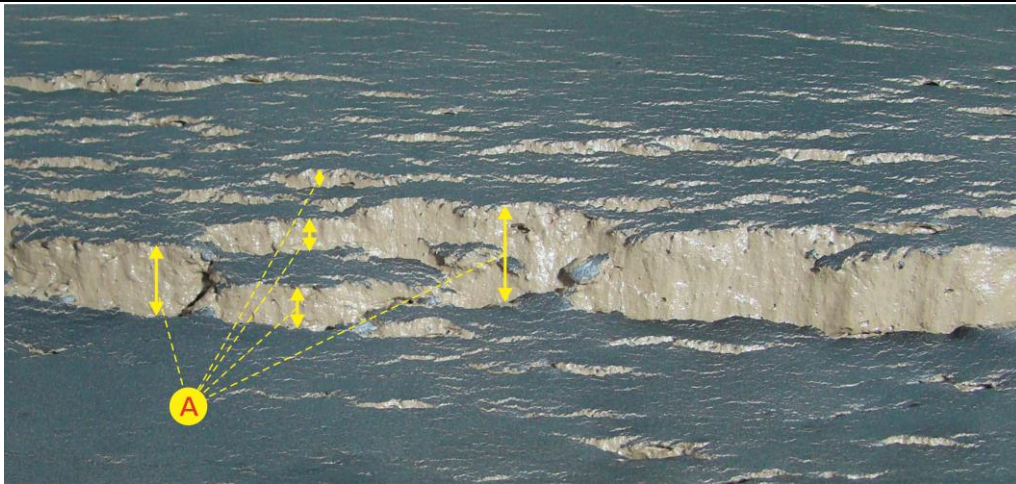


Рисунок 3 – Фото крыла структуры растяжения с системой сбросовых разрывов. Линии со стрелками показывают накопленную амплитуду (А) вертикального смещения. Для контрастности на поверхность модели нанесено напыление темного красителя до начала эксперимента.

Результаты и их обсуждение. Проведено две серии экспериментов, по три эксперимента в каждой, при постоянных геометрических и реологических параметрах моделей, но меняющихся от серии к серии скоростях деформирования. Для каждого эксперимента на исходной фотографии модели выделялись несколько тестовых разрывов и путем последовательного промера всей совокупности фотографий для них составлялись временные ряды накопленной амплитуды смещения. Сопоставление полученных результатов показало, что в пределах одной серии временная динамика смещений по разрывам в структурах растяжения от эксперимента к эксперименту в целом одинакова. В этой связи, для характеристики найденных закономерностей ограничимся демонстрацией результатов одного эксперимента и каждой серии.

На рисунках 4 и 5 показана динамика изменения накопленной амплитуды смещения и её приращения во времени на тестовых разрывах в структурах растяжения, формирующихся в моделях, при скоростях их деформирования 10^{-5} м/с и 10^{-4} м/с соответственно. Из приведенных графиков видно, что процесс в целом направленного увеличения амплитуды во времени реализуется колебательным, поступательно-возвратным режимом, когда её частное возрастание сопровождается реверсным снижением, то есть за сбросовым смещением по разрыву следует реверсное взбросовое (рис.4-А, 5-А). Наиболее отчетливо этот процесс отражается в вариациях приращений амплитуды, положительные и нулевые значения которых соответственно указывают на её рост или неизменность, а отрицательные значения, на её уменьшение за расчетный временной интервал (рис.4-Б, 5-Б). Сопоставление графиков рисунков 4 и 5 показывает, что реверсные взбросовые смещения чаще реализуются на разрывах структур растяжения, формирующихся при низкой скорости деформирования моделей. Так при скорости деформирования 10^{-5} м/с на развивающемся разрыве фиксируется примерно равное количество сбросовых и взбро-

совых подвижек, то при её увеличении (10^{-4} м/с) доля последних сокращается до 25-30%.

Частные вариации накопленной амплитуды смещения на разрыве группируются в более крупные колебания, занимающие более продолжительные временные интервалы, что наглядно иллюстрирует кривая её средних значений на графике А рисунка 4 (оранжевая сглаженная кривая). Подобная квазипериодичность деформационного процесса более высокого масштабного ранга на одном разрыве отражает стадийность и этапность процесса формирования всей совокупности разрывов в структуре растяжения, что в свою очередь является общей закономерностью деформационной эволюции внутренней структуры крупных разломных зон [6].

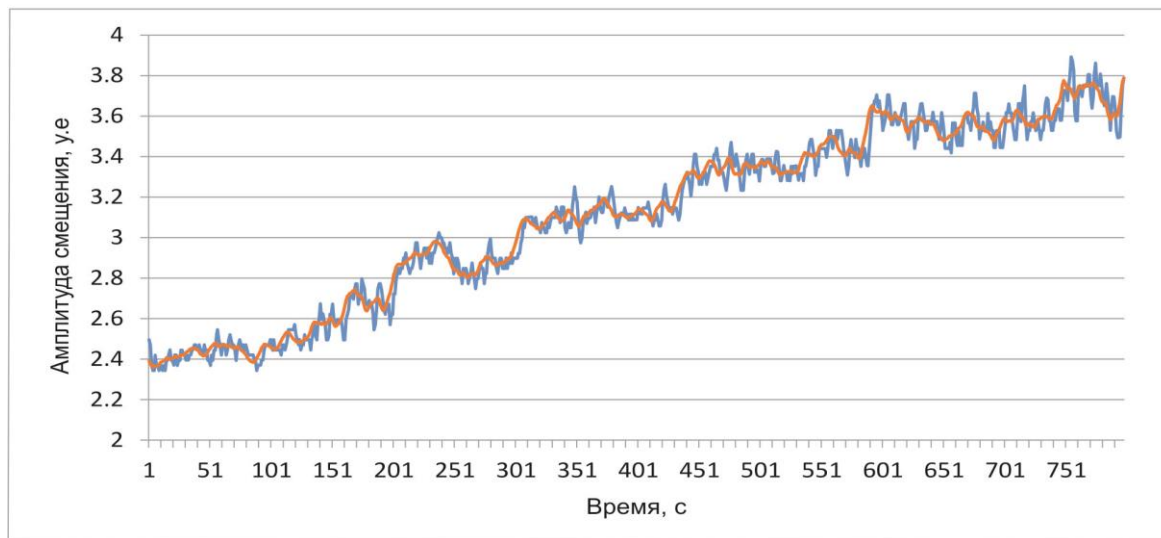
Аналогичные вышеописанным знакопеременные смещения экспериментально выявлены авторами ранее для разрывов сдвиговых зон по результатам обработки полученных с моделей фотоматериалов методом корреляции цифровых изображений [Борняков и др.2016]. Компьютерная высокоточная обработка первичной фотофактуры показала, что смещения, реализующиеся импульсной подвижкой, часто сопровождаются постсмещением в виде ускоренного крипа, согласным по направлению с реализованной подвижкой или обратной ей. Такое постсмещение обеспечивается особенностями поведения частично нарушенного упруговязкопластичного модельного материала, как эквивалента литосферы, проявляющей аналогичные реологические свойства при длительно действующих на неё тектонических нагрузках.

Периодические быстрые, сейсмогенные смещения на разломах в сейсмических зонах реализуются по механизму прерывистого скольжения «stick-slip» [10]. В прикладном аспекте важно иметь критерии диагностики перехода того или иного сейсмического разлома в предсейсмогенное состояние. Экспериментальные прогнозные исследования модели «stick-slip» показали наличие непосредственно перед импульсной подвижкой

кооперативного эффекта в деформационном процессе в виде автоколебаний [7,11]. Аналогичные автоколебания прослеживаются и в экспериментально полученных нами деформационных кривых

(рис.4-А, врезки 1 и 2). Существование такого синергетического эффекта в естественных условиях перед сильным землетрясением подтверждается данными деформационного мониторинга [9,12].

А



Б

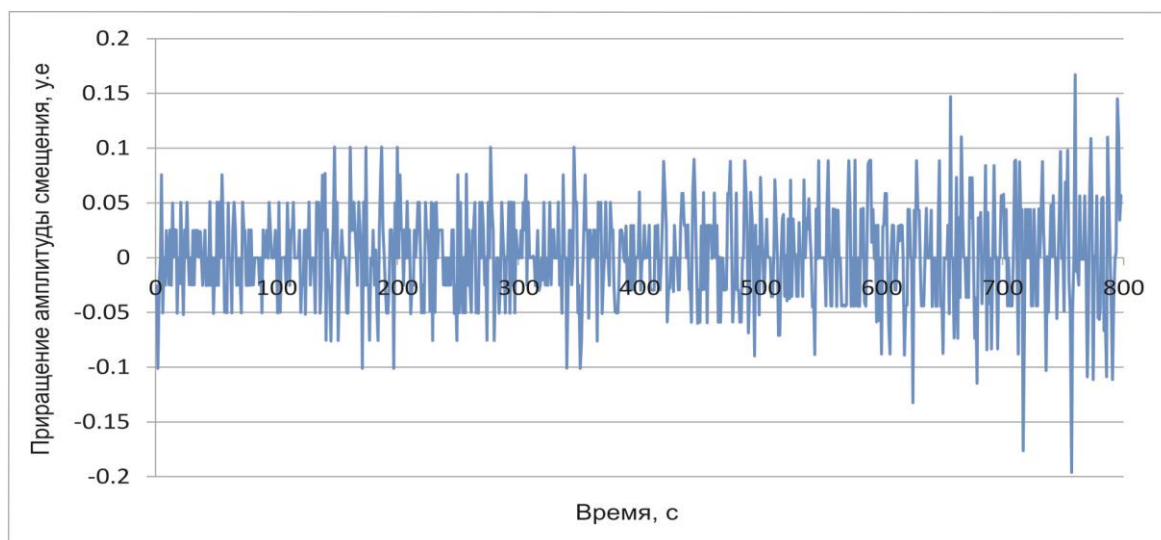


Рисунок 4 – Вариации накопленной амплитуды смещения (синяя кривая) и её средних значений (оранжевая кривая) (А), и приращения амплитуды за единицу времени (Б) на разрыве в формирующейся структуре растяжения при скорости деформирования модели 10^{-5} м/с.

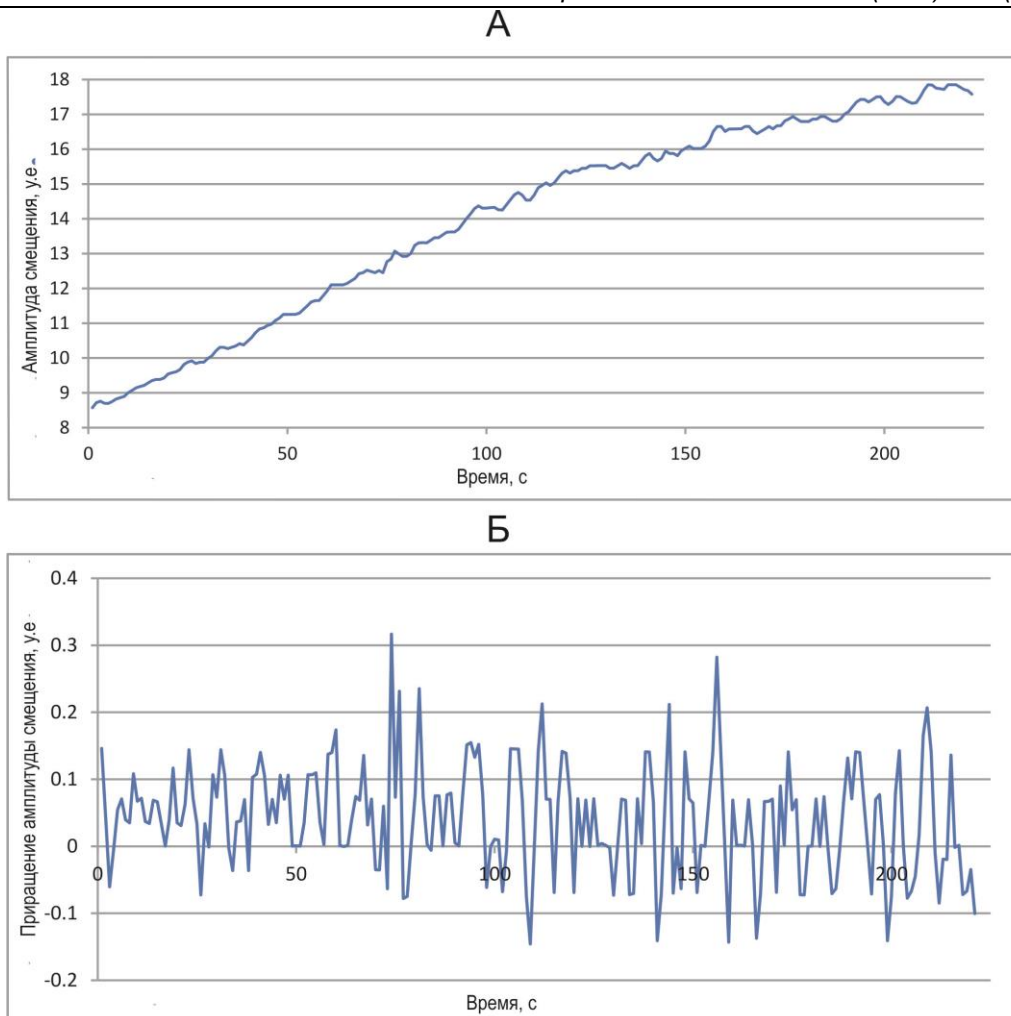


Рисунок 5 - Вариации накопленной амплитуды смещения (А) и её приращения за единичный интервал времени (Б) на разрыве в формирующейся структуре растяжения при скорости деформирования модели 10^{-4} м/с.

Выводы. Выполнено физическое моделирование процесса формирования структуры растяжения в упруговязкопластичной модели литосферы с целью изучения временной вертикальной динамики смещений на составляющих её внутреннее строение разрывах. Установлено, что на фоне однонаправленного общего тренда увеличения амплитуды, её накопление на разрыве происходит в колебательном, поступательно-возвратном режиме, не смотря на постоянную скорость нагружения модели. Такой режим обеспечивает появление на разрыве в условиях постоянно действующего растяжения не только сбросовых, но и обратных, взбросовых смещений. Реализация последних обусловлена особенностями поведения частично нарушенной упруговязкопластичной среды. С точки зрения полученных результатов находится объяснение появлению в Байкальской рифтовой зоне и в других крупных структурах растяжения литосферы, землетрясений с механизмом, отличным от рифтогенного [3].

Список использованных источников

1. Борняков С.А., Пантелеев И.А., Тарасова А.А. Дискретно-волновая динамика деформаций в сдвиговой зоне: результаты физического модели-

рования // Геодинамика и тектонофизика. 2016. №2 с, 289-302.

2. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. - М.: Наука, 1975. - 536 с.

3. Дядьков П.Г., Мельникова В.И., Саньков В.А., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Тимофеев В.Ю. Современная динамика Байкальского рифта: эпизод сжатия и последующее растяжение в 1992–1996 гг. // Доклады РАН. – 2000. – Т. 372, № 1. – С. 99–103.

4. Милановский Е.Е. Рифтовые зоны континентов. М., Недра. 1976. 279с.

5. Семинский К.Ж. Структурно-механические свойства глинистых паст как модельного материала в тектонических экспериментах. Иркутск: ИЗК СО АН СССР, 1986. – 130 с. – ВИНТИ 13.08.86., № 5762-В86.

6. Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разрывных зон: тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во «ГЕО», 2003. 244 с.].

7. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: МАИК «Наука». 2003. 270с

8. Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. – Новосибирск: Наука. Сиб. Отд-ние, 1977. – 102с.

9. Bornyakov S.A., Ma J., Miroshnichenko A.I., Guo Y., Salko D.V., Zuev F.L. Diagnostics of meta-instable state of seismically active fault // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2017. №4. С.989-998.

10. Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as a mechanism for earthquake // *Science*. 1966. V. 153. P.990-992.

11. Ma J., Guo Y., Sherman SI. 2014. Accelerated synergism along a fault: A possible indicator for an impending major earthquake *Geodynamics & Tectonophysics*. 2, 87–99.

12. Vstovsky G.V., Bornyakov S.A. First experiences of seismodeformation monitoring of Baikal rift zone (by the example of South-Baikal earthquake of August 27, 2008) // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*. 2010. No.10. P.667-672.

ВЛИЯНИЕ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД НА КАЧЕСТВО ДАННЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Голь Евгения Михайловна

Аспирант

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа

университет нефти и газа

(национальный исследовательский университет)

имени И.М. Губкина»

19991, Россия, Москва, Ленинский проспект, дом 65, корпус 1

evggol93@mail.ru +79028202462

PERMAFROST FORMATIONS INFLUENCE ON THE SEISMIC DATA QUALITY

Gol Evgeniya Mihailovna

PhD-student

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)»

19991, Russia, Moscow, Leninskiy prospect 65

evggol93@mail.ru +79028202462

АННОТАЦИЯ

Наличие в верхней части геологического разреза мерзлых пород верхняя часть разреза на территории Западной Сибири является одной из главных проблем обработки и интерпретации данных сейсморазведки. Изменчивость свойств пород данного типа вызывает ряд осложнений при проведении многих геофизических работ (особые условия заземления при расстановке приёмников, осложненное проведение взрывных работ), а в особенности, наличие осложнений многолетнемерзлых пород в разрезе затрудняет интерпретацию сейсморазведочных данных. На данный момент сейсмическая разведка является ведущим методом полевых геофизических исследований, в связи с чем совершенствование методологии сейсморазведки является важным и актуальным направлением для повышения качества исследований.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, сейсморазведка, многокомпонентная сейсморазведка, интерпретация.

ABSTRACT

Permafrost formations in the near-surface sections in Western Siberia are one of the main problems of the seismic data processing and interpreting. The variability of the properties of this type of the rocks causes to a number of complications during many geophysical works (special grounding conditions for the placement of receivers, complicated explosions), especially, the presence of the permafrost formations in the sections makes it difficult to interpret seismic data. Nowadays, the seismic survey is the most effective method of the geophysical exploration, that is why the development of the seismic survey methodology is important and relevant direction.

Keywords: permafrost formations, seismic survey, multicomponent seismic, interpretation.

Осложнения, связанные со спецификой сейсморазведки в северных районах, возникают ещё на этапе проведения сейсморазведочных работ. Сейсмическая съёмка в условиях крайнего севера выполняется при использовании специализированной машинной техники, строительстве временных дорог, зимников и переправ. Сложная техногенная обстановка приводит к нерегулярности в сети физических наблюдений, а также пропускам и смещениям пунктов взрыва и приема. Это говорит о том, что при работе в сложных поперечност-

ных условиях возникают значительные трудовые, временные, а иногда и дополнительные экономические затраты.

В настоящее время без проведения сейсморазведочных работ не обходится ни один успешный проект по разведке и разработке нефтяных или газовых месторождений. При этом, требования, предъявляемые к методам сейсморазведки, означают, что решаемые данным видом работ задачи заключаются не только в выделении и изучении геологических структур, потенциальных для