

УДК 550.83:621.644

**ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ  
В КОМПЛЕКСЕ ЛИНЕЙНЫХ ИНЖЕНЕРНО-  
СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗЫСКАНИЙ**

**Тиркель М.Г., Туманов В.В., Савченко А.В., Юфа Я.М.,  
Шурховецкий С.А., Сухинина Е.В.**  
(УкрНИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

*В умовах вічної мерзлоти виконані геофізичні дослідження району переходу трубопроводу «Східна Сибір-Тихий океан» через р. Олекма комплексом сейсмозвідувальних (КМЗХ) і електромагнітних (ПЕМПЗ і СГДК-А) методів.*

*In conditions of permafrost structural-geodynamic mapping of the crossing area of “Eastern Siberia- the Pacific” over the Olyokma River has been performed using a complex of seismic exploration and electromagnetic methods.*

Особое внимание при проектировании и строительстве трубопроводов уделяется изучению горно-геологических условий территорий их расположения [1]. Статистика аварий и катастроф на трубопроводах подтверждает тот факт, что большой процент аварий происходит по причинам геологического (геодинамического) характера [2]. Поэтому актуальным является выявление и детализация участков, потенциально опасных по возникновению аварийных ситуаций, к которым, прежде всего, относятся переходы трубопроводами русел рек.

По современным представлениям вся земная кора разбита на блоки различных размеров [3, 4]. Они находятся в постоянном движении [4, 5]. Эти движения пульсационного, знакопеременного или однонаправленного характера со скоростью от миллиметров до десятков миллиметров в год.

Границы между блоками различной тектонической активности представляют собой, как правило, участки разуплотненных, трещиноватых горных пород и называются геодинамическими зонами (ГДЗ). Разуплотненные и трещиноватые породы обеспечивают повышенную фильтрацию как природных, так и техногенных вод, что совместно с подвижками по ГДЗ способствует интенсивному разрушению трубопроводов.

Наиболее эффективными методами исследований геодинамических процессов горных массивов являются геофизические, поскольку любое изменение свойств горных пород и их состояния обеспечивает заметное отклонение от фоновых значений физических полей над данными геологическими объектами.

Задачи исследований заключались в оценке геодинамического состояния, а также в уточнении геологического и тектонического строения горного массива на одном из участков перехода трубопровода "Восточная Сибирь - Тихий океан" (ВСТО) через реку Олёкма в Амурской области.

Исследуемая часть трассы ВСТО расположена в гористой местности Амурской области в бассейне р. Олёкма. Поверхностный слой сложен щебенистыми грунтами на берегах, а также аллювиальными и флювиогляциальными отложениями в русле р. Олекма, залегающих на коренных кристаллических породах.

По геолого-тектоническому и глубинному строению, степени проявления новейших тектонических движений исследуемая территория входит в Олёкминскую развивающуюся морфоструктуру Байкальской рифтовой зоны Забайкальской области умеренного горообразования.

Для решения поставленных задач были выбраны сейсморазведка корреляционным методом преломленных волн (КМПВ), а также бесконтактные методы регистрации естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) и структурного геодинамического картирования азимутального (СГДК-А). Опыт применения указанных методов для решения аналогичных задач изложен в справочной и технической литературе [6-12].

Методом КМПВ решались задачи литологического расчленения верхней части геологического разреза, определения глубины залегания и рельефа поверхности коренных пород и мощности зоны выветривания (экзогенной трещиноватости), выявления тектонических нарушений и сопровождающих их зон нарушенных пород под перекрывающие отложения. Методами ЕИЭМПЗ и СГДК-А решались задачи заверки положения выделенных сейсморазведкой тектонических нарушений, изучения напряженно-деформированного состояния пород, оценки геодинамической активности зон тектонических нарушений, построения карты геодинамической зональности.

Полевые геофизические исследования выполнены методом КМПВ по 5 профилям, ЕИЭМПЗ по 9 профилям, СГДК-А по 8 профилям. Профиль 1 проложен по трассе проектируемого трубопровода. Профили 2-5 проложены по руслу р. Олекма и пересекают профиль 1. Общий объем исследований составил 10,39 км.

Наблюдения **КМПВ** выполнены по четырехкратным системам встречных и нагоняющих годографов преломленных волн с регистрацией продольных волн (вертикальная ориентация сейсмоприёмников). Шаг ПП (пунктов приема) равен 5 м. Максимальный интервал регистрации – 280 м. Интервал возбуждения колебаний – 55-60 м. Максимальный вынос ПВ – 175 м. В качестве регистрирующей аппаратуры использовалась разработанная в УкрНИМИ 12-канальная цифровая накапливающая сеймостанция REZ-12С. Возбуждение колебаний производилось путем ударов молота по деревянной подложке. На одно физическое наблюдение производилось от 10 до 64 синфазных накоплений – в зависимости от соотношения сигнал – помеха. Шаг дискретизации сигнала при записи 0,25 мс.

Обработка материалов КМПВ производилась с помощью специализированного программного комплекса «HEADWAVE» По данным обработки выполнялась аппроксимация преломляющих границ геологическими границами и составлялись сейсмогеологические разрезы. Граничные скорости отождествлялись с пластовыми скоростями продольных волн.

Исследования методом **ЕИЭМПЗ** выполнены с помощью радиоволнового индикатора напряженно-деформированного состояния грунтов прибором РВИНДС. Выбор данного типа прибора обусловлен необходимостью проведения измерений в зимний период в условиях отрицательных температур. Прибор позволяет проводить измерение уровня потока ЕИЭМПЗ в частотном диапазоне 1-50 кГц с выборкой подсчета импульсов 0-10000 с<sup>-1</sup>.

Используемое для анализа естественное импульсное электромагнитное поле Земли возникает в горном массиве в результате необратимых деформаций зерен минералов диэлектриков или заполненных электролитом капилляров при критических значениях механических напряжений [6]. Сопровождающие эти процессы электроразрядные явления проявляются в виде электромагнитных импульсов, временная интенсивность которых качественно отражает геодинамическое состояние горного массива. В зонах структурных нарушений горного массива, в которых активно происходит накопление или перераспределение напряжений, интенсивность электромагнитной эмиссии значительно выше, чем в средах с релаксированными напряжениями, с повышенной трещиноватостью и (или) обводненностью, в которых электромагнитная эмиссия близка к фоновым значениям.

В соответствии с теоретическими и экспериментальными основами метода по повышенным значениям ЕИЭМПЗ выделяются зоны напряженно-деформированного состояния пород, а по пониженным – зоны разрывных нарушений, повышенной трещиноватости или обводненности пород. Относительная величина аномалии позволяет качественно судить об интенсивности проявления нарушения пород. Измерения ЕИЭМПЗ выполнены по всем профилям с шагом 5 м.

**Структурное геодинамическое картирование азимутальное (СГДЖ-А)** основано на концепции, согласно которой текущие геодинамические процессы, приуроченные к тектоническим нарушениям фундамента и осадочного чехла, достаточно отчетливо проявляются в динамике физико-химических свойств горных сред поверхностного горизонта [7-9].

В основе структурно-геодинамического картирования горных массивов положены принципы и методы, разработанные при изучении тектонического строения шахтных полей Донбасса в 1970-1980 г.г. Ю.С. Рябоштаном [8]. Основная задача СГДК – прослеживание и наблюдение в массиве горных пород современных тектонических деформаций и геодинамических зон. В связи с расширением работ в восточных регионах России становятся актуальными возможности использования методов СГДК для оценки геодинамического состояния трасс проектируемых трубопроводов.

СГДК-А – азимутальный способ, оперирующий гармоническими полями, базируется на установленном явлении азимутальной неоднородности электропроводности различных сред поверхностного горизонта в связи с текущими геодинамическими процессами коренного массива [7, 9].

Азимутальная неоднородность электропроводности поверхностных сред (далее просто азимутальная электропроводность) обнаруживает несколько фоновых и аномальных уровней. Аномальные значения она приобретает над разрывными нарушениями и зонами их динамического влияния, над приповерхностным карстом, геологическими уступами, локальными магматическими объектами, формирующимися оползневыми отрывами и пр., что позволяет участки с аномальной азимутальной электропроводностью относить к геодинамическим зонам. Через азимутальную неоднородность обнаруживаются и деформации грунтов, обусловленные интенсивными инженерными воздействиями на горную среду.

Реализация способа СГДК-А, в сущности, сводится к картированию зон аномального проявления азимутальной электропроводности (далее геодинамических зон) с последующим установлением природы объектов и процессов, их провоцирующих.

Основным техническим средством реализации способа является полевой прибор "ЭФА" [7]. Сущность метода заключается в следующем: в точках геофизического профиля в поверхностном слое породного массива возбуждают первичное электромагнитное поле на фиксированной рабочей частоте и

регистрируют амплитуды магнитной составляющей вторичного поля по кругу с центром в точке профиля.

Полевые измерения прибором ЭФА проводились на тех же профилях, что и методом ЕИЭМПЗ с шагом 5 м. По результатам измерений электропроводности по 12 направлениям (по кругу через 30°) рассчитывались критерии:  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ .

Критерий  $K_1$  отражает по профилю вариации дисперсии осей азимутальной электропроводности грунтов и характеризует степень изменения фонового поля данного параметра над зонами тектонических нарушений. Количественная оценка процесса дисперсии производилась по специальной вероятностной шкале, с последующим осреднением ( $K_1 \rightarrow \Sigma K_1$ ).

Критерии  $K_2$  и  $K_3$  являются вспомогательными и отражают отклонение ориентировок азимутальной электропроводности на пикете соответственно от мегарегионального и регионального фона.

**Результаты геофизических исследований** приводятся на примере профиля №1, пройденного вдоль трассы трубопровода (рис. 1).

На разрезах КМПВ прослеживается две преломляющие границы, соответствующие кровле и подошве зоны выветривания коренных пород.

Первый от дневной поверхности слой составляют щебенистые грунты на берегах, а также аллювиальные и флювиогляциальные отложения в русле р. Олекма. Поскольку породы пребывают в замерзшем состоянии, скорость продольных волн ( $V_p$ ) вблизи дневной поверхности изменяется, в зависимости от степени обводненности, от 1800 м/с на слабообводненных участках до 3500 – 3700 м/с в русле реки и на участках мерзлых обводненных грунтов. В русле реки ниже уровня сезонного промерзания породы находятся в оттаявшем состоянии. Первая преломляющая граница прослеживается фрагментарно и характеризует поверхность трещиноватых коренных пород. Достоверность определения глубины ее залегания весьма низка особенно в центральной части русла реки из-за высокого фона регулярных помех, создаваемых многократными отражениями обменных волн в волноводе,

образуемом таликом. Глубина залегания поверхности трещиноватых коренных пород по данным КМПВ изменяется от 2 м до 20 м, граничная скорость продольных волн в слое находится в пределах 3000 – 4100 м/с.

Нижняя граница зоны трещиноватости коренных пород залегает на глубинах от первых метров на склонах речной долины до 40 м и более в центральной части русла реки. В разрезе, пересекающем реку, профиль поверхности слабовыветрелых коренных пород имеет форму каньона, с более пологим склоном ( $17^{\circ}$ - $18^{\circ}$ ) со стороны левого берега реки и более крутым (около  $45^{\circ}$ ) – со стороны правого берега. Наиболее глубоко залегают коренные породы по данным КМПВ в районе ПК370 профиля 1. Граничные скорости изменяются от 3500 до 5660 м/с. Обширная зона пониженной скорости (ПК55-ПК415) связана с крупным тектоническим нарушением, вдоль которого развивалась речная долина. В конечной части профиля 1 (ПК620 – ПК690) наблюдается зона резкого ухудшения прослеживаемости сейсмических границ, по-видимому, также связанная с тектоническим нарушением. Низкие значения скорости и резкое понижение видимой частоты волнового поля в этой области может указывать на то, что породы в этой части профиля находятся в талом состоянии. Область развития талика в русловой части (ПК135 – ПК415 профиля 1) определяется изменением характера волнового поля, обусловленным снижением кажущейся скорости обменных волн, образующихся в слое с пониженной скоростью (волноводом), и возникновением интерференционной картины, создаваемой наложением многократно отраженных обменных волн.

Значения вертикальной составляющей  $E_z$  **ЕИЭМПЗ** на исследуемой территории изменяются от 5 до 75 отн. ед. Преобладают пониженные значения  $E_z$  равные 20-30 отн.ед. (см. рис. 1). Это объясняется наличием слоя мерзлых и многолетнемерзлых пород.

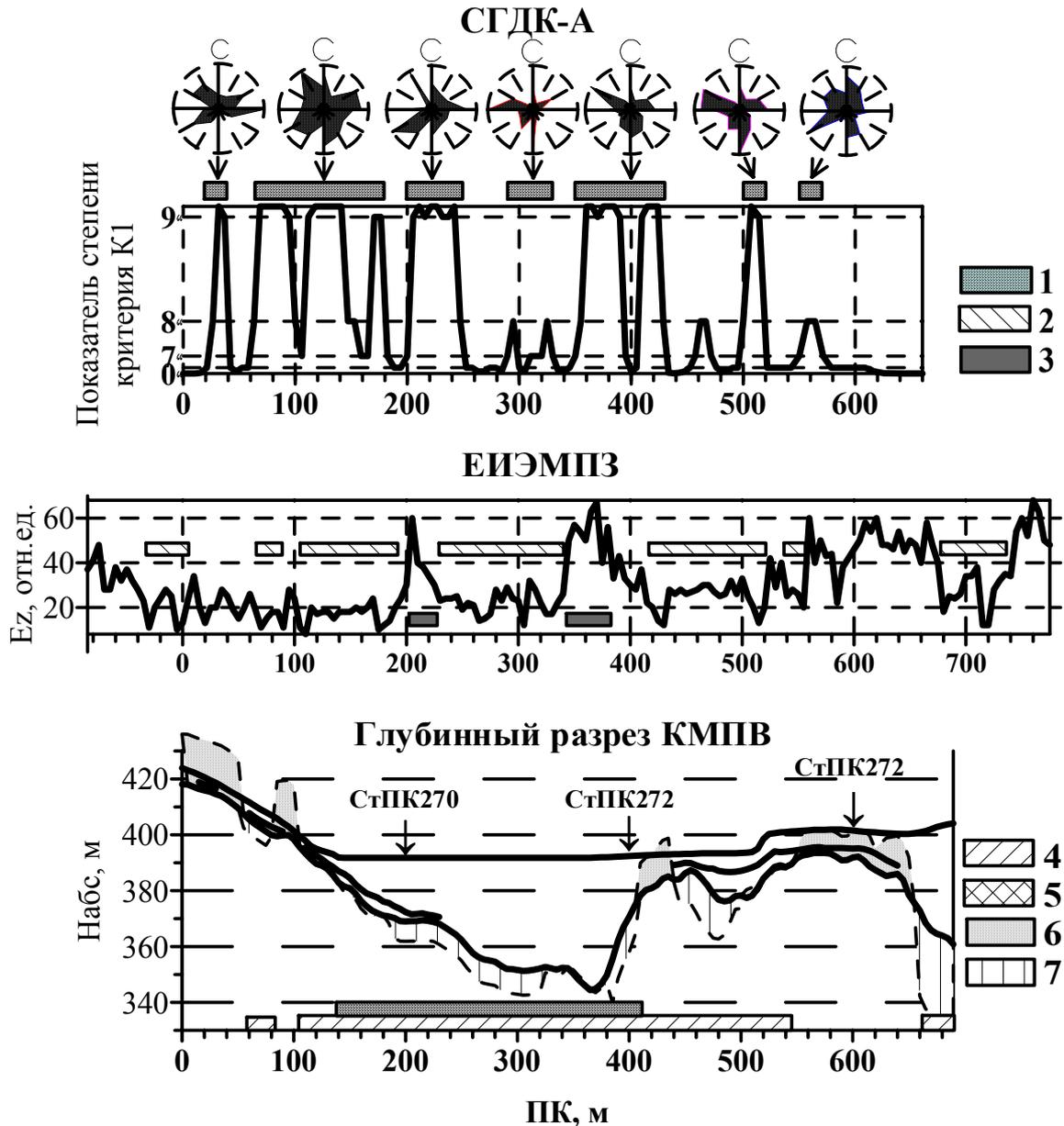


Рис.1. Результаты комплексных геофизических исследований вдоль проектируемой трассы трубопровода "ВСТО" на участке перехода через р. Олекма: 1 - геодинамические зоны; 2 - зоны тектонической нарушенности; 3 - зоны повышенного напряженного состояния пород; 4 - зона тектонического нарушения; 5 - талик; 6, 7 - значения скорости продольных волн соответственно выше и ниже средних по слою коренных пород (сплошная линия - кровля сейсмического слоя, пунктир - относительное изменение скорости продольных волн слоя)

Уровень поля естественно-напряженного состояния пород закономерно уменьшается от 20-70 отн.ед. на склоновых частях долины до, в основном, 5-20 отн.ед. по руслу реки. Пониженные значения ЕИЭМПЗ по руслу реки, очевидно, связаны с большой мощностью (40 м) обводненных, выветрелых пород. В отдельных 20-50 м интервалах по руслу реки значения ЕИЭМПЗ возрастают до 30-60 отн.ед. с размахом до  $\pm 10$  отн. ед. Эти участки соответствуют повышенному напряженно-деформированному состоянию пород. Зоны тектонических нарушений выделялись по пониженным относительно соседних участков значениям ЕИЭМПЗ. В аномальных зонах значения ЕИЭМПЗ снижаются в среднем на 10-20 отн.ед.

На каждом профиле выделяется по 3-7 зон аномально пониженных значений ЕИЭМПЗ, отождествляемых с зонами проявления тектонических нарушений (разуплотненных, трещиноватых пород) в приповерхностных слоях грунтов.

На отдельных пикетах выполнена оценка изменения горизонтальной составляющей потока ЕИЭМПЗ по значений в северо-восточном и северо-западном направлениях. Указанная закономерность проявляется достаточно устойчиво практически на всех пунктах и отражает, по-видимому, преобладание ориентировок региональных структур.

Методом СГДЖ-А по критерию  $\Sigma K_1$  на каждом профиле выделены аномальные интервалы азимутальной электропроводности (см. рис. 1). Для каждого аномального интервала составлена круговая диаграмма.

По совокупности наблюдений по всем профилям участка был установлен региональный фон азимутальной электропроводности участка. Фоновое поле азимутальной электропроводности грунтов участка близко к мегарегиональному фону с преобладающей ориентировкой в широтном и меридиональном направлениях.

Одним из критериев аномальности в способе выступает показатель степени искажения качественных характеристик фонового поля азимутальной электропроводности. В аномальных интервалах ориентировка тектонических зон перпендикулярна ориентировке максимальной электропроводности. Практически

по всем аномальным зонам преобладает ориентировка максимального электросопротивления (ориентировка тектонических зон) в северо-восточном и северо-западном направлениях, что согласуется с данными ЕИЭМПЗ (рис. 2, 3).

По выявленным аномалиям и их ориентировке составлена карта геодинамической зональности участка исследований (рис. 3).

В пределах исследуемой площади на земной поверхности выделено 10 геодинамических зон зоны северо-восточного простирания СВ-1 - СВ-4; зоны северо-западного простирания СЗ-1 - СЗ-6.

По комплексу признаков (интенсивность проявления, протяженность выявленных аномалий) наиболее высокоактивная ГДЗ СВ-2, низкоактивная ГДЗ СЗ-1, остальные отнесены к среднеактивным.

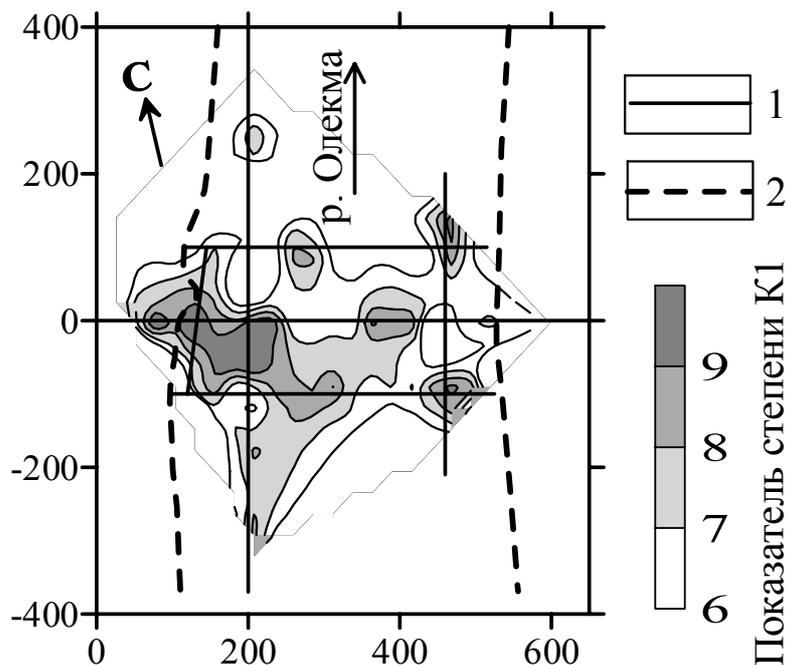


Рис. 2. Карта аномалий критерия K1 по данным СГДК-А: 1 - геофизический профиль; 2 - берег реки

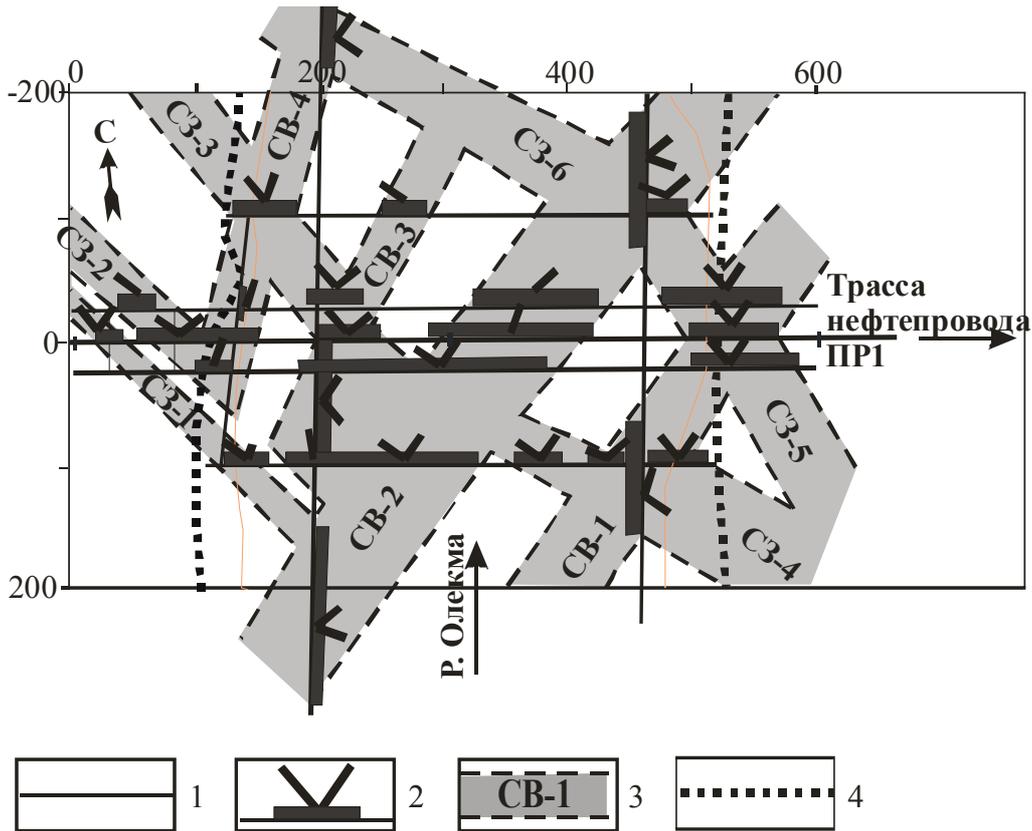


Рис. 3. Карта геодинамической зональности участка перехода нефтепровода через р. Олекма (по данным СГДК-А): 1 - профили СГДК-А; 2 - аномалии СГДК-А и их ориентировка; 3 - геодинамические зоны и их индекс; 4 – берег р. Олекмы

Непосредственно по оси трубопровода выделено пять аномалий, в том числе две аномалии приурочены к береговым участкам реки и две – непосредственно к руслу реки.

Участки ГДЗ, пересекающие трубопровод, характеризуются повышенным напряженно-деформированным состоянием пород и являются наиболее опасными с точки зрения возникновения аварийных ситуаций.

Полученные результаты по СГДК-А согласуются с данными микролинеamentного анализа (анализа линейных форм рельефа местности) – на участке пересечения реки с трубопроводом наблюдается пересечение линеamentов северо-восточного и северо-западного простираний. В данном месте река течет в субмеридиональном направлении. В региональном плане река

имеет направление по азимуту  $330^{\circ}$ . На участке пересечения реки с трубопроводом выявлены линеаменты с азимутами простираний  $50^{\circ}$  и  $310^{\circ}$ .

## **ВЫВОДЫ.**

В результате комплексных геофизических исследований на участке пересечения реки с трубопроводом построен сейсмогеологический разрез и установлено следующее:

1. По данным КМПВ прослеживаются две преломляющие границы, соответствующие кровле и подошве зоны выветривания коренных пород.

2. Граница коренных пород минимальная (до 10 м) на береговых склонах и максимальная (40 м и более) по руслу реки.

3. Обширная зона пониженной скорости продольных волн (ПК55-ПК415) связана с крупным тектоническим нарушением, вдоль которого развивалась речная долина.

4. Низкие значения скорости продольных волн и резкое понижение видимой частоты волнового поля в этой области может указывать на то, что породы в этой части профиля находятся в талом состоянии.

5. Пониженные значения ЕИЭМПЗ по руслу реки, очевидно, связаны с большой мощностью (40 м) обводненных, выветрелых пород.

6. Региональная ориентировка электропроводности грунтов (по СГДК-А) соответствует субмеридиональной ориентировке русла реки в данном месте. Ориентировка локальных аномалий в северо-восточном и северо-западном направлении соответствует ориентировке линеаментов поверхности земли.

7. По выявленным СГДК-А аномалиям и их ориентировке составлена карта геодинамической зональности участка исследований. Участки ГДЗ, пересекающие трубопровод, характеризуются повышенным напряженно-деформированным состоянием пород и являются наиболее опасными по возникновению аварийных ситуаций.

Выполненные исследования раскрывают достаточно сложную картину геодинамической зональности на участке

перехода трубопровода через русло реки и представляют практический интерес для разработки мероприятий по предотвращению возникновения аварийных ситуаций на участках трассы с повышенным напряженно-деформированным состоянием пород.

### СПИСОК ССЫЛОК

1. СНиП 1.02.07-87. Инженерные изыскания для строительства / Госстрой СССР, ГУГК СССР. - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. - 104 с.
2. Геодинамика и её экологические проявления / Б.И. Воевода, Е.Г. Соболев, А.Н. Русанов, О.В. Савченко // Наук. пр. ДонНТУ: Сер. гірнично-геологічна. - Донецьк, 2001. – Вип. 23. С. 3-10.
3. Тяпкін К.Ф. Фізика Землі: Підручник. - К.: Вища шк., 1998. - 291 с.: ил.
4. Яницкий И.Н. Живая Земля. – М.: Изд-во Агар, 1998. - 79 с.
5. Штенгелов Е.С. Короткопериодическая пульсация Земли и геологический катаклизм 1999-2002 гг. - Одесса: Астропринт, 1999. - 120 с.: ил.
6. Методические рекомендации по изучению напряженного состояния горных пород методом ЕИЭМПЗ. – Симферополь: Изд-во ИМР, 1991. - 27 с.
7. А. с. 693317 СССР, G 01 V 3/12. Способ геоструктурного картирования / Ю.С. Рябоштан, Е.П. Тахтамиров (СССР). - №2493904; Заявлено 8.06.77; Опубл. 25.10.79; Бюл. № 39. – 11 с.
8. Рябоштан Ю.С. Методические рекомендации по структурно-геодинамическому картированию / МУП СССР, ПО «Укр-углегеология», - Донецк, 1988. - 204 с.
9. Панов Б.С., Тахтамиров Е.П. Новое в геолого-геофизических исследованиях // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. - 1993. - № 3. С. 57-67.
10. Огильви А. А. Основы инженерной геофизики. - М.:Недра, 1990. - 468 с.

11. Электроразведка: Справочник геофизика / Под ред. А. Г. Тархова. - М.: Недра, 1980. - 518 с.
12. Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмологии. - М.: Изд-во МГУ, 1981. - 176 с.