

УДК 550.834:622.12

СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ДОНЕЦКОГО БАССЕЙНА

**Майборода А. А., Глухов А. А., Набокова В. В.,
Тиркель И. М.**

(УкрНИИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

Розроблено сейсмогеологічні моделі і проведено математичне моделювання основних типів геологічних порушень вугільних пластів Донецького басейну для теоретичного обґрунтування сейсморозвідувальних досліджень з метою прогнозу цих ускладнень.

Seismic models are developed and mathematical simulation of the main coal seam faults for the Donets Coal Basin is conducted for theoretical justification of seismic surveying with a view to predict such problems.

Сейсморазведочные исследования, проводимые с целью изучения и прогноза геологической нарушенности угольных пластов, основываются на тщательном анализе геолого-физических характеристик среды, влияющих на параметры физических полей. Результаты такого анализа позволяют построение корректной физической модели реальной структуры, провести обоснованное математическое моделирование, наметить направления теоретических и экспериментальных исследований, объективно оценить аномалиеобразующие факторы, что в целом в значительной мере повышает обоснованность и достоверность сейсморазведочных прогнозов.

По генетической классификации угленосных формаций Донецкий бассейн относится к типу передовых (краевых) прогибов

геосинклинальной группы орогенного этапа развития с преобладающими лагунно-морскими и лагунно-озерными фаціальными обстановками осадконакопления и углеобразования. В геоструктурном отношении он относится к Доно-Днепровскому прогибу протерозойского заложения, представляющего собой сложную гетерогенную структуру, наложенную на позднепротерозойский авлакоген, который, начиная с позднего визе, был вовлечен в геосинклинальное развитие южных окраин Восточно-Европейской платформы. Начиная с конца раннего и до начала позднего карбона включительно происходило накопление мощной параличской угленосной субформации [1, 2].

Геологическое строение угленосных формаций Донецкого бассейна свидетельствует о том, что слагающие их угленосные толщи или среда постановки сейсморазведочных исследований представляет собой типичную слоисто-однородную структуру, включающую ритмичное чередование гранулометрически различных по разрезам и сравнительно однородных по наслоению литологических разностей терригенных пород с включением маломощных угольных пластов и известняков [3].

Горно-геологические условия отработки угольных пластов Донецкого бассейна весьма разнообразны, как разнообразны и обусловленные ими различные осложнения. Последние зачастую взаимосвязаны, т.е. если говорить о задачах горно-геологического прогноза, например, в выемочных столбах, то в каждом из них, как правило, можно встретить не менее двух типов осложнений.

Наиболее распространенными и значимыми геологическими нарушениями и связанными с ними осложнениями в Донецком бассейне являются тектонические мелкоамплитудные дизъюнктивные нарушения, в меньшей степени – пликативные, значительные осложнения могут возникать при нарушении морфологии угольных пластов – их размывов. С зонами повышенной трещиноватости массивов горных пород связаны такие осложнения, как неустойчивость кровли угольных пластов и прорывы подземных вод в горные выработки. Эти факторы подлежат первоочередному сейсмогеологическому моделированию для даль-

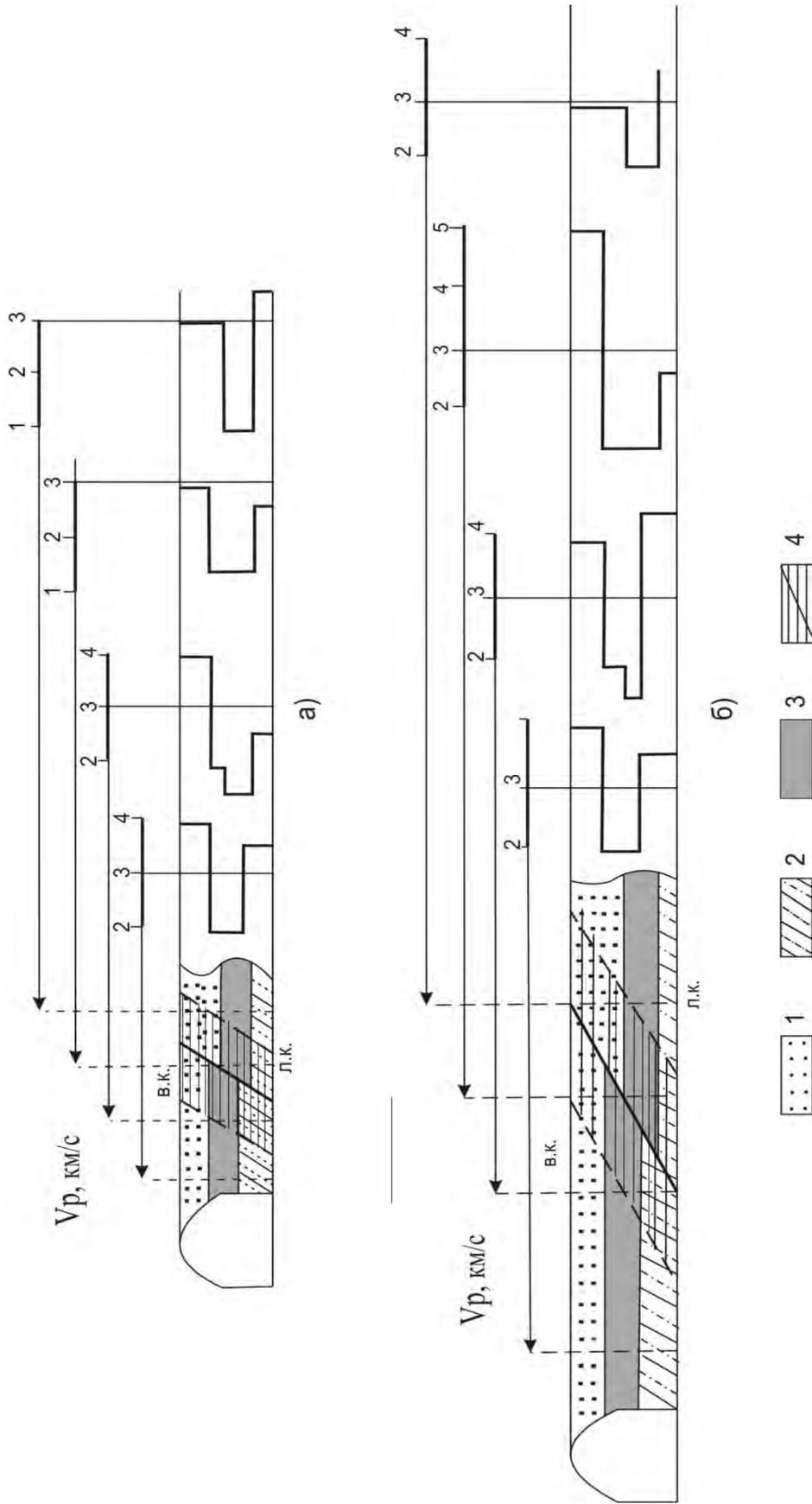
нейших исследований, происходящих в их зонах волновых процессов [4-6].

Весьма разнообразны по параметрам, углам встречи с плоскостями угольных пластов и горными выработками генетически однотипные геологические нарушения угольных пластов. Многообразие вариантов геологических нарушений не позволяет надежно унифицировать их моделирование [7]. Для каждого конкретного случая необходимо построение модели, отвечающей по всем основным характеристикам моделируемому разрезу и геологическому нарушению (литологическим, эпигенетическим, упругим, типу нарушения и его параметрам и т.д.)

В основу каждой сейсмогеологической модели закладывается информация о положении моделируемого участка разреза угленосной толщи в петрофизическом разрезе бассейна и соответствующие упругие характеристики углей и углевмещающих пород, усредненные значения которых приведены в работах [4, 6].

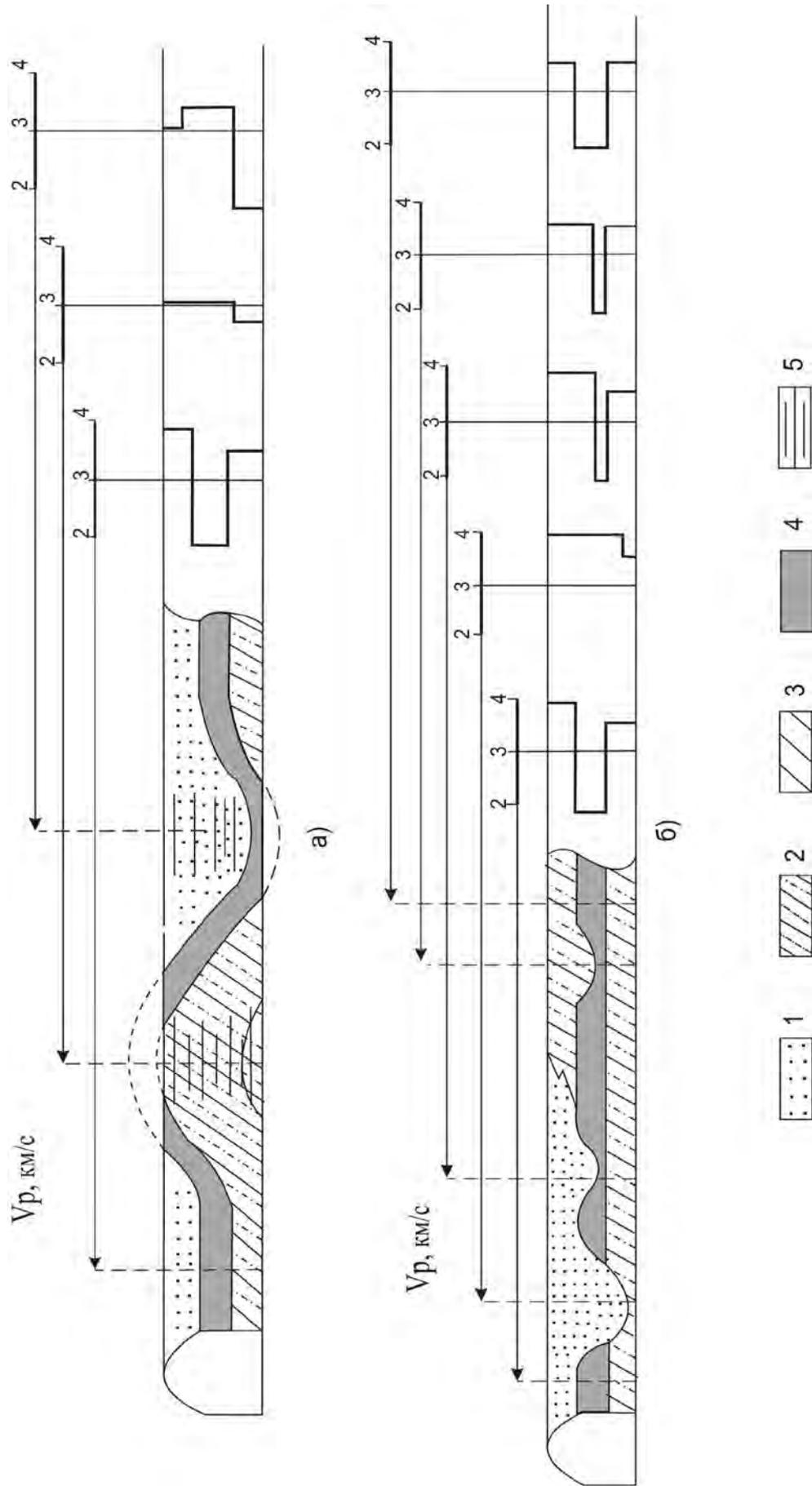
Ниже приведены, в качестве примеров, сейсмогеологические модели, разработанные для основных, характерных для Донбасса, типов геологических нарушений, демонстрирующие принципы построения таких моделей, сейсмические характеристики углей и вмещающих пород и их изменения в зонах нарушений и связанных с ними осложнений [6].

Модели разработаны для тектонических нарушений сбросового и надвигового типов (рис. 1), пликативных нарушений (рис. 2 а), размывов угольного пласта (рис. 2 б), а также для участков «ложной» и труднообрушаемой кровли (рис. 3 а, б) и возможных прорывов подземных вод в горные выработки (рис. 3 в). В моделях заложены определенные скоростные характеристики (V_p , км/с), для углей (мощность пласта 1,0 м) и вмещающих пород, находящихся в интервале петрофизического разреза, отвечающему началу позднего катагенеза (угли марки Ж) в Кальмиус - Торецкой котловине (табл. 1). Интервал петрофизического разреза выбран, как типичный для шахтных полей таких крупных шахт, как «Красноармейская-Западная № 1», «Краснолиманская», им. А. Ф. Засядько.



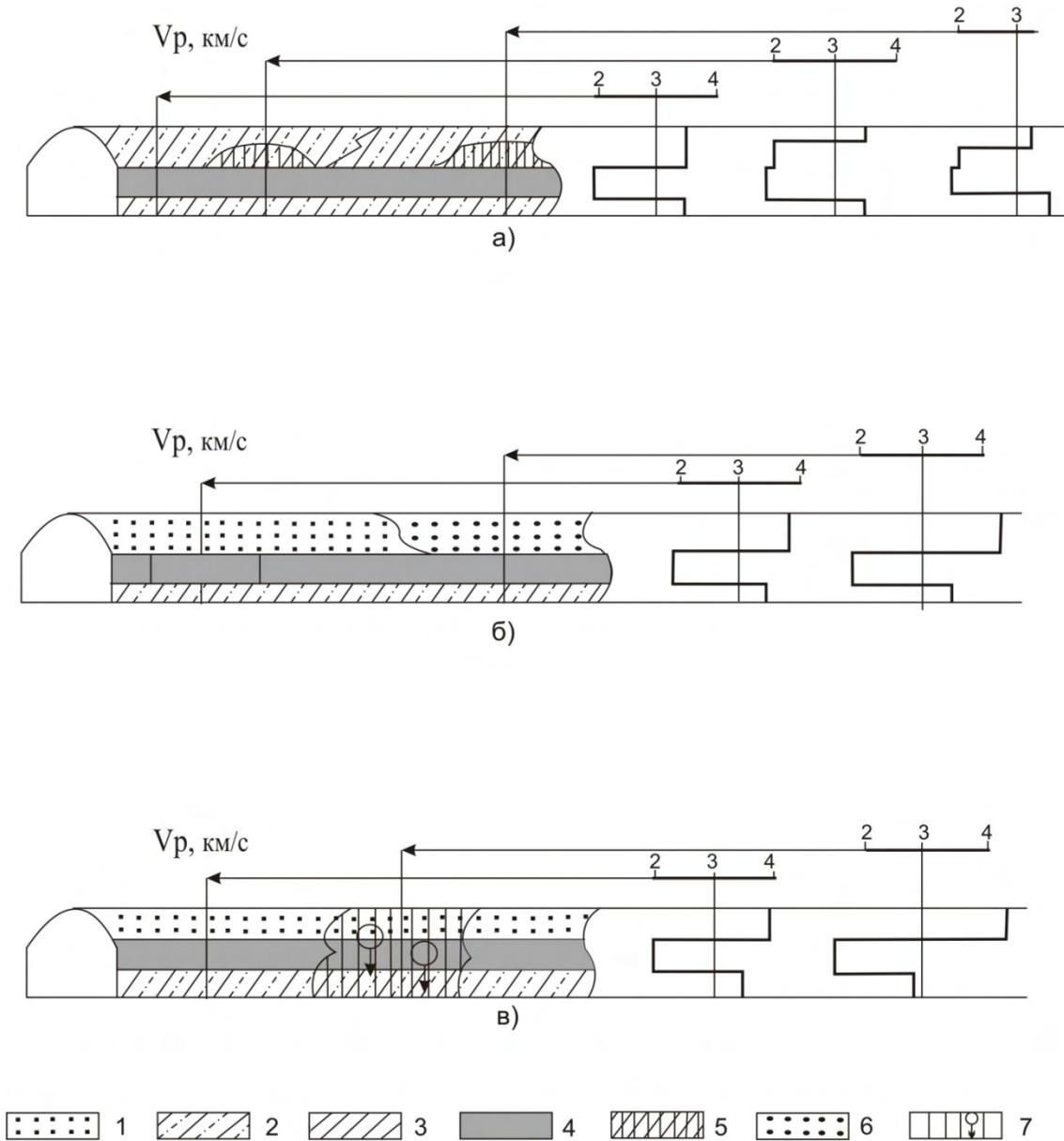
1 – песчаник; 2 – алевролит; 3 – уголь; 4 – сместитель и зона повышенной трещиноватости углей и пород.

Рис. 1. Сейсмогеологические модели дизъюнктивов сбросового, взбросового (а) и надвигового (б) типов (стадия эпигенеза с углями марки Ж)



1 – песчаник; 2 – алевролит; 3 – аргиллит; 4 – уголь; 5 – зона трещиноватости пород.

Рис. 2. Сейсмогеологические модели пликативов (а) и размывов угольного пласта (б) (стадия эпигенеза с углями марки Ж)



1 – песчаник; 2 – алевролит; 3 – аргиллит; 4 – уголь; 5 – «ложная» кровля; 6 – труднообрушаемый песчаник; 7 – зона водонасыщенности пород и углей.

Рис. 3. Сейсмогеологические модели участков с:

- а) «ложной» кровлей;
- б) труднообрушаемой кровлей;
- в) зоной водонасыщенности углей и вмещающих пород (стадия эпигенеза с углями марки Ж)

Таблица 1

Усредненные значения V_p , км/с для углей и вмещающих пород в зонах влияния тектонических нарушений, включающих угли марки Ж

Литология	Без нарушений	Дизъюнктивы				Пликативы
		сбросы		надвиги		замк. части складок
		вис.кр.	леж.кр.	вис.кр.	леж.кр.	
уголь	1,9	1,4	1,4	1,4	1,4	1,6
аргиллит	3,2	2,4	2,4	4,0	2,4	2,7
алевролит	3,5	2,6	2,6	4,4	2,6	3,0
песчаник	3,9	2,9	2,9	4,9	2,9	3,3

-25 % -25 % +25 % -25 % - 15 %

В этой же таблице 1 для построения моделей заложены изменения параметров скорости продольных волн пород в зависимости от типа разрывного нарушения. У надвигов в висячем крыле происходит уплотнение пород и увеличение значения упругих свойств, в лежачем крыле – разуплотнение и снижение этих значений. У сбросов в обоих крыльях происходит разуплотнение и соответственно снижение значений этих параметров (рис.1). Величина аномальных изменений упругих характеристик (V_p , км/с) в зонах влияния дизъюнктивных нарушений принимается условно 25 % от фоновых. Однако следует учитывать, что в реальных условиях максимальные аномальные изменения этих свойств (20 % - 30 % от фоновых) отмечаются вблизи сместителя нарушения с плавным, постепенным выполаживанием по обе стороны от него до фоновых к перифериям зоны влияния. Серию сближенных мелкоамплитудных дизъюнктивов следует рассматривать, как образующих единую зону влияния (повышенной трещиноватости пород), с аномальными значениями упругих характеристик, шириной на порядок больше амплитуд крайних в этой серии нарушений.

У пликативных нарушений зоны их влияния связаны с повышенной трещиноватостью пород в замковых частях антиклинальных и синклинальных складок (в 3 – 10 раз выше, чем на

крыльях). Ширина этих зон и интенсивность трещиноватости пород зависят от величин двугранных углов складок (шарниров), литологического состава углевмещающих пород и степени их эпигенеза. Величина аномальных изменений упругих параметров в зонах влияния пликативных нарушений условно принимается 15 % от фоновых (см. рис. 2 а).

Для седиментационных нарушений угольного пласта в виде их размывов аномалии физических полей связаны, прежде всего, со сменой литологического состава в разрезе, когда уголь замещается терригенными породами. Интенсивность и резкость проявления аномалий зависят от глубины эрозионного среза размыва и угла между плоскостью контакта уголь – порода и плоскостью угольного пласта (см. рис. 2 б).

На рисунке 3 а представлены сейсмогеологические модели «ложной» кровли, под которой понимаются неустойчивые слои пород незначительной (0,4 – 1,0 м) мощности, залегающие непосредственно над угольным пластом. В Донбассе «ложная» кровля представлена в основном (свыше 80 % случаев) аргиллитом повышенной трещиноватости, иногда перемятой текстуры, слабого сцепления и менее прочным, чем вмещающие породы. Распространяются «ложные» кровли в виде локальных зон, характеризующихся аномалиями физических полей, составляющими в среднем порядка 40 % значений скорости V_p от фоновых. В целом в зонах нахождения «ложной» кровли скорость продольных волн уменьшается в 1,5 – 2,0 раза по сравнению с непосредственной кровлей однозначного литологического состава.

Для труднообрушаемых кровель (см. рис. 3 б) угольных пластов характерны в основном однородные, монолитные, весьма прочные ($\delta_{сж} = 50 – 150$ МПа), достаточно мощные и практически не трещиноватые (1 – 2 трещины на 1 м) песчаники (иногда известняки) [8]. Эти характеристики могут обуславливать аномальные изменения упругих параметров в виде повышения значений V_p ориентировочно порядка до 10 %.

Сейсмогеологическое моделирование водонасыщенных зон углепородного массива опирается на данные работы [9], в которой указано, что при насыщении аргиллитов и алевролитов пресноводными или минерализованными водами скорость продоль-

ных волн существенно снижается (в 1,2 раза и более, или в среднем на 20 %). В песчаниках при насыщении их водой V_p возрастает, в среднем на 7,5 %. Эффект уменьшения скорости продольных волн в аргиллитах и алевролитах объясняется снижением вязкости глинистого вещества в этих пределах. Что касается углей, то увеличение их влажности также приводит к уменьшению скорости упругих колебаний [10] в среднем на 20 % (см. рис. 3 в).

В разработанные модели могут быть заложены любые параметры геологических нарушений, определенные реальные литологические типы пород кровли и почвы угольных пластов и упругие параметры пород, находящихся на любых стадиях эпигенеза. Эти модели и приведенные в них показатели аномалий физических полей могут быть приняты за основу сейсмогеологического моделирования конкретных участков углепородных массивов Донбасса с осложняющими их горно-геологическими факторами.

В целом, сейсмогеологическое моделирование является первым этапом теоретического обоснования сейсморазведки. Следующий этап математического моделирования позволяет определить закономерности взаимодействия сейсмоакустических колебаний с геологическими нарушениями угольных пластов. Ниже приведены результаты моделирования в условиях Донецкого угольного бассейна.

При описании параметров дизъюнктивов в оконтуренном выработками отрабатываемом пространстве разными вариантами метода сеймопросвечивания надо учитывать следующее:

– изменения амплитудных, частотных и скоростных характеристик информативных волновых пакетов, вызванные увеличением размеров зон влияния нарушений типа сброс и серий малоамплитудных дизъюнктивов, аналогичны изменениям, вызванным уменьшением плотности среды и скоростей распространения сейсмоакустических волн (в пределах 10 - 25 % для амплитудных показателей; 2 – 3 % для скоростей; 10 % – для частот);

– на основе анализа полученных в результате обработки частотных, скоростных и амплитудных характеристик сейсмических волновых пакетов можно оценить параметры $\Delta V_p \times l_{\text{угля}}$ и $\Delta V_s \times l_{\text{угля}}$, где ΔV_p и ΔV_s – степень изменения скоростей волн сжа-

тия и сдвига в зоне аномалии; $l_{\text{угля}}$ – ширина зоны влияния аномалии по углю;

– как критерий определения типа нарушения нужно использовать тот факт, что для надвига в сравнении со сбросами характерна на 25 % более сильная зависимость амплитуд волновых пакетов от амплитуды нарушения и размеров зоны влияния и на 40 – 50 % более слабая зависимость частотных характеристик;

– смещение максимумов частотных спектров каналовых волн и высокочастотных составляющих волн сдвига в область низких частот на 20 – 40 Гц свидетельствует о достоверном наличии дизъюнктива; в случае надвига, если ближе к источнику расположено висящее крыло, величина сдвигов в среднем на 50 % меньше, чем в других случаях;

– смещение максимумов частотного спектра боковых волн на величину 5 – 15 Гц в низкочастотную область свидетельствует о достоверном наличии сброса (серии сбросов) или о наличии надвига (при этом ближе к источнику расположено лежащее крыло);

– смещение максимумов частотного спектра боковых волн на величину 5 – 15 Гц в область высоких частот свидетельствует о достоверном наличии надвига (при этом ближе к источнику расположено висящее крыло).

Кроме того, для массива со сближенными угольными пластами принципиально возможно определение не только амплитуды нарушения, но и направления сдвига вдоль нарушения. Наиболее информативны в этом случае амплитудные характеристики боковых волн сдвига. Так смещение в одну со сторон может приводить до 10 – 20 % разности в сравнении с противоположным вариантом при других равных условиях. В случае сближенных пластов существуют зависимости амплитудных характеристик волновых пакетов от размеров зоны влияния аномалии и от степени изменения плотности и скоростных характеристик угля в зоне трещиноватости с учетом типа нарушения, которые можно использовать в роли систем критериев прогноза типа и параметров тектонических нарушений.

Для сброса характерно увеличение значений времен первых вступлений и времен прихода максимумов амплитуд пропорцио-

нально увеличению ширины зоны трещиноватости. Для нарушения типа надвиг аналогичной зависимости выявить не удастся.

Независимо от типа нарушения наблюдается значительное увеличение на общем фоне низкочастотных колебаний, в наибольшей мере для частот от 25 до 50 Гц. Сдвиг высокочастотных максимумов (с частотой от 200 до 300 Гц) частотного спектра боковых волн на величину 5 – 20 Гц в низкочастотную область свидетельствует о наличии сброса или о наличии надвига (при этом ближе к источнику расположено висящее крыло). Сдвиг низкочастотных максимумов (частота от 10 до 100 Гц) в низкочастотную область на 5 – 7 Гц служит признаком наличия сброса, в высокочастотную область на 10 – 15 Гц – надвига источником со стороны висящего крыла.

При прогнозе пликативных нарушений принципиально возможно выявление складок на основе анализа амплитудных, частотных и скоростных характеристик волн, которые преодолевают нарушение, а также путем регистрации отраженных волн.

Складка может быть найдена методом сеймопросвечивания с использованием сейсмической томографии, если соотношение H/R не превышает 0,7. При меньших H/R изменение амплитуды P и SV волн может достигать 25 %, а частоты 10 – 15 Гц, что можно зарегистрировать современной аппаратурой и использовать в качестве критерия.

Наиболее информативны боковые волны сдвига. Изменение амплитуды SH волн также может достигать 20 – 25 %, изменения частоты практически не наблюдается. Уменьшение амплитуды волновых пакетов любых типов волн тем больше, чем меньше значение H/R и меньше радиус мульды.

Зависимость частотных характеристик волн от параметров мульды установить на данном этапе исследований не представляется возможным, поэтому использование АЧХ в качестве информативного критерия не возможно.

Границы складки также могут быть оконтурены методом отраженных волн в случае, если соотношение H/R не превышает 0,7. Наиболее информативны боковые волны сдвига и SH . Но идентифицировать тип нарушения и отличить аномалию от ано-

малій других типів методом отражених волн не представляється можливим.

При прогнозі уточнень слід відзначити наступне:

– аномалія може бути знайдена методом сейсмопросвічування з використанням сейсмічної томографії;

– основними факторами, впливними на формування хвильового поля в зоні утончення пласта, є амплітуда утончення (глибина ерозионного среза размыва), його протяжність і градієнт зміни потужності пласта в зоні переходу від ненарушеного до затронутого стану;

– збільшення значення h викликає зниження амплітуди сигналу, реєструваного за утонченням; при цьому воно тим більше, чим більше протяжність порушення;

– на зміну характерних частот SV хвиль впливає потужність хвильовода; в робочій діапазоні частот (до 400 Гц) при зменшенні h до величини приблизно $2/3 M$ спостерігається поступовий ріст характерних частот; при подальшому зменшенні h – різке зменшення;

– спектри SH хвиль при наявності размыва розщеплюються; основний максимум зсувається в область низьких частот; в низькочастотній частині спектра (на частотах від 0 до 100 Гц) з'являється додатковий максимум; його величина тим більше, чим більше амплітуда размыва і ширина зони аномалії; описане поведіння SH хвиль характерно до значень $h = M$;

– в разі різкого переходу від ненарушеної частини пласта до утонченої для значущих амплітуд порушення (не менше 40 – 60 % потужності пласта) можливо формування відбитого сигналу і межі аномалії можуть бути оконтурені методом відбитих хвиль; однак ідентифікувати тип порушення і відізнати аномалію від аномалій інших типів методом відбитих хвиль не представляється можливим.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Методи формационного аналізу вугленосних товщ; під ред. Г. А. Іванова, Н. В. Іванова. — М. : Недра, 1975. — 199 с.

2. Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР : в 12 т. — М. : Госгеолтехиздат, 1963. — Т. 1 : Угольные бассейны и месторождения юга европейской части СССР. — 1210 с.
3. Тиркель М. Г., Майборода А. А. Основные результаты сейсмогеологического анализа угленосных формаций Донбасса : сб. науч. тр. / Национальный горный университет. — Днепропетровск, 2005. — № 23. — С. 128—136.
4. Анциферов А. В. Теория и практика шахтной сейсморазведки. — Донецк : Алан, 2003. — 312 с.
5. Комплексование геофизических методов / А. В. Анциферов, М. М. Довбнич, А. А. Калашник, А. А. Майборода и др. ; под ред. К. Ф.Тяпкина. — Донецк : Вебер, 2008. — 336 с.
6. Майборода А. А. Сейсмогеологическое моделирование нарушений угольных пластов верхнепалеозойских бассейнов стран СНГ : сб. науч. тр. / УкрНИМИ НАНУ. — Донецк, 2012. — № 10. — С. 105—148.
7. Майборода А. А., Тиркель М. Г. Типизация геологических нарушений угольных пластов при их прогнозе методами шахтной геофизики: сб. науч. тр. / УкрНИМИ НАНУ. — Донецк, 2011. — № 9, ч. 1. — С. 394—404.
8. Геологические работы на угледобывающих предприятиях Украины. Инструкция / РД 12.06.204 – 99. — К., 2001. — 384 с.
9. Многоволновые сейсмические исследования угольных месторождений Донбасса / М. Т. Хохлов, О. М. Харитонов, П. Г. Трифонов и др. — К. : Наук. думка, 1990. — 132 с.
10. Физические и химические свойства ископаемых углей. — М. — Л. : изд. АН СССР, 1962. — Вып. XVI. — 267 с.