

УДК 550.34(477)

## СЕЙСМИЧНОСТЬ И СЕЙСМОТЕКТОНИКА НАДВОРНЯНСКОГО НЕФТЕГАЗОНОСНОГО РАЙОНА (УКРАИНСКОЕ ПРЕДКАРПАТЬЕ)

Л.Е. Назаревич<sup>1</sup>, А.В. Назаревич<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, отдел сейсмичности Карпатского региона, Львов

<sup>2</sup> Карпатское отделение Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Львов

Поступила в редакцию 31.10.15

Представлен анализ особенностей сейсмотектонического процесса в Надворнянском нефтегазоносном районе (Украинское Предкарпатье). Уточнение локализации очагов местных землетрясений выполнено с применением разработанных авторами в предыдущие годы методик, а определение направлений вспарывания разрывов в очагах — с использованием азимутальных годографов. Выявлена приуроченность очагов местных землетрясений к разноглубинным поверхностям скольжения надвигов, окружающих складки с ловушками-залежами углеводородов. Хорошим индикатором преобладающих (реализуемых в условиях сжатия) взбросовых механизмов очагов и соответствующей «жесткости» их излучения является выраженный отрицательный (порядка  $-0,5$ ) крипекс этих землетрясений. Направления вспарывания разрывов в очагах местных землетрясений индицируют современное напряженно-деформированное состояние структур коры этого района, обусловленное геодинамическими процессами в Карпатском регионе Украины, с преобладанием субширотного сжатия, вызванного, с одной стороны, транслируемым через Складчатые Карпаты дифференцированным давлением (в северо-восточном направлении) структур террейнов Алькапа и Тисия-Дакия в Закарпатском прогибе, а с другой — вклиниванием с запада–северо-запада вдоль зоны Тессейра-Торнквиста края Западно-Европейской платформы. Индуцирование активизации местной сейсмичности в 1996–2011 гг. обусловлено изменением напряжений в коре и гидродинамики флюидов в разломных зонах в связи с добычей нефти и газа, закачкой воды и др.

*Ключевые слова:* сейсмичность, сейсмотектоника, Надворнянский нефтегазоносный район, Украинское Предкарпатье.

### Введение

В последнее время многие ученые, в том числе и сейсмологи, стали уделять больше внимания вопросам сейсмичности территорий, где активно разрабатываются залежи нефти и газа. Причиной такого повышенного внимания стало увеличение числа и силы землетрясений в регионах нефтегазодобычи, которые до начала промышленной эксплуатации месторождений были почти асейсмичными или на них происходили единичные землетрясения. На территории бывшего СССР внимание к этой проблеме привлекли, в частности, катастрофические землетрясения в районе Газлийского газового месторождения (Средняя Азия) в 1976 и 1984 гг. с магнитудой  $M$  6,8 и 7,3 соответственно, а также Нефтегорское землетрясение 1995 г. с  $M = 7,2$  на Сахалине. Подобные процессы в последние десятилетия отмечаются и на территории Восточного Предкавказья и Южного Предуралья (Керимов и др., 2012; Нестеренко, 2012). Дополнительно актуализировала эту проблематику возрастающая в последние годы сейсмичность в зонах добычи сланцевых углеводородов методом гидроразрыва. Так, эксперты из Колумбийского университета и университета штата Оклахома указывают на прямую связь между

разработкой залежей сланцевого газа и увеличением количества землетрясений в ряде штатов США. Около 50 землетрясений с  $M = 3$  за восемь месяцев разработки сланцевого газа зафиксировано в городе Блэкпул (Англия) (Geomechanical..., 2011). Исследователи из Колумбийского университета (Keranen et al., 2013) считают, что длительное использование метода гидроразрыва пласта (ГРП) негативно влияет на разломы земной коры.

Связанная с нефтедобычей сейсмичность фиксируется и в Украинском Предкарпатье. Здесь в 1976 г. в районе нефтепромыслов города Долины произошел ряд ощутимых (с  $I = 5-6$  баллов по шкале MSK-64) землетрясений. В районе газового месторождения Лопушна (Покутско-Буковинские Карпаты) в первые полгода эксплуатации (1986 г.), вероятно, из-за тектонических движений вышли из строя в связи с повреждениями (срез и смятие обсадных колонн) несколько скважин (Крупский, 2001; Шеремета и др., 2004). По мнению ряда ученых (в частности, Н.И. Николаева, 1995 г.), причиной этих землетрясений стала активная добыча углеводородов в зонах концентрации напряжений. Откачка нефти/газа приводит к изменениям во времени и в пространстве гидродинамического режима глубинных флюидов, что может служить спусковым

механизмом для возникновения индуцированной сейсмичности.

Подобные процессы резкой активизации местной сейсмичности наблюдаются в последние годы и в Надворнянском нефтегазоносном районе Предкарпатья (рис. 1) (Назаревич, 2015; Назаревич, Назаревич, 2015). Ниже представлены полученные к настоящему времени (включая новые данные) результаты исследований особенностей сейсмотектонического процесса в данном районе.

### Сейсмичность Надворнянского нефтегазоносного района

На территории Украинского Предкарпатья уже более 150 лет происходит активное освоение залежей углеводородов. Здесь еще с середины XIX в. в районе городов Борислав и Долина, а позже и в районе города Надворная добывают нефть. В 1980-е гг. в районе Надворной были открыты и начали эксплуатироваться новые месторождения (Шеремета и др., 2004) (рис. 2). Начиная с 1996 г. (рис. 2, 3) здесь зафиксировано проявление и последующее повышение сейсмической активности, хотя раньше землетрясения не фиксировались ни макросейсмически, ни инструментально. Мониторинг территории велся четырьмя сейсмическими станциями, расположенными в радиусе 50–100 км, начиная с 1960-х гг.

Детальные сейсмические наблюдения в Карпатском регионе Украины ведутся с 1961 г. С увеличением в последующие десятилетия числа сейсмических станций в Карпатах, Закарпатье и Предкарпатье (сейчас здесь работает 20 сейсмических станций)

и использованием современной цифровой аппаратуры, применением новых методик гипоцентрии (Назаревич, Назаревич, 2003, 2004) стало возможным значительно точнее локализовать очаги землетрясений (определять их координаты и глубины) и тем самым дешифровать тектонически активные структуры литосферы региона. Именно слабые сейсмические события, являющиеся следствием активных деформационных процессов (как естественных, так и техногенных), несут важную информацию об изменении напряженно-деформированного состояния геологической среды во времени. Пространственный анализ локализации очагов землетрясений дает возможность трассировать активные в настоящее время разломы.

Первые единичные землетрясения с магнитудой  $M = 1–2,5$  в Надворнянском районе были зафиксированы в 1996 г. С 2004 по 2010 г. количество зарегистрированных в этом районе землетрясений с  $M = 1,5–2,5$  увеличилось до 3–5 (рис. 3), максимум активности имел место в 2008 г. (11 событий). Всего зарегистрировано более 30 землетрясений указанной магнитуды. По историческим данным (архивы, церковные хроники), в XVIII–XIX вв. на этой территории не зафиксировано ни одного ощутимого местного землетрясения, хотя удаленные землетрясения с эпицентрами в зоне Вранча (Румыния) здесь ощущались 4-х-бальными сотрясениями (Кендзера и др., 1997).

Исследования активизировавшейся в последнее время природной сейсмичности района, определение тектонической позиции очагов местных землетрясений, оценки величин и характера напряжений в геологической среде играют важную роль

### Carpathian Seismological Network of Ukraine



Рис. 1. Надворнянский нефтегазоносный район (окоптурен овалом) на карте Карпатского региона Украины. Основа рисунка — изображение GoogleEarth, поверх которого показана структура рельефа и сеть сейсмических станций (кружочки)

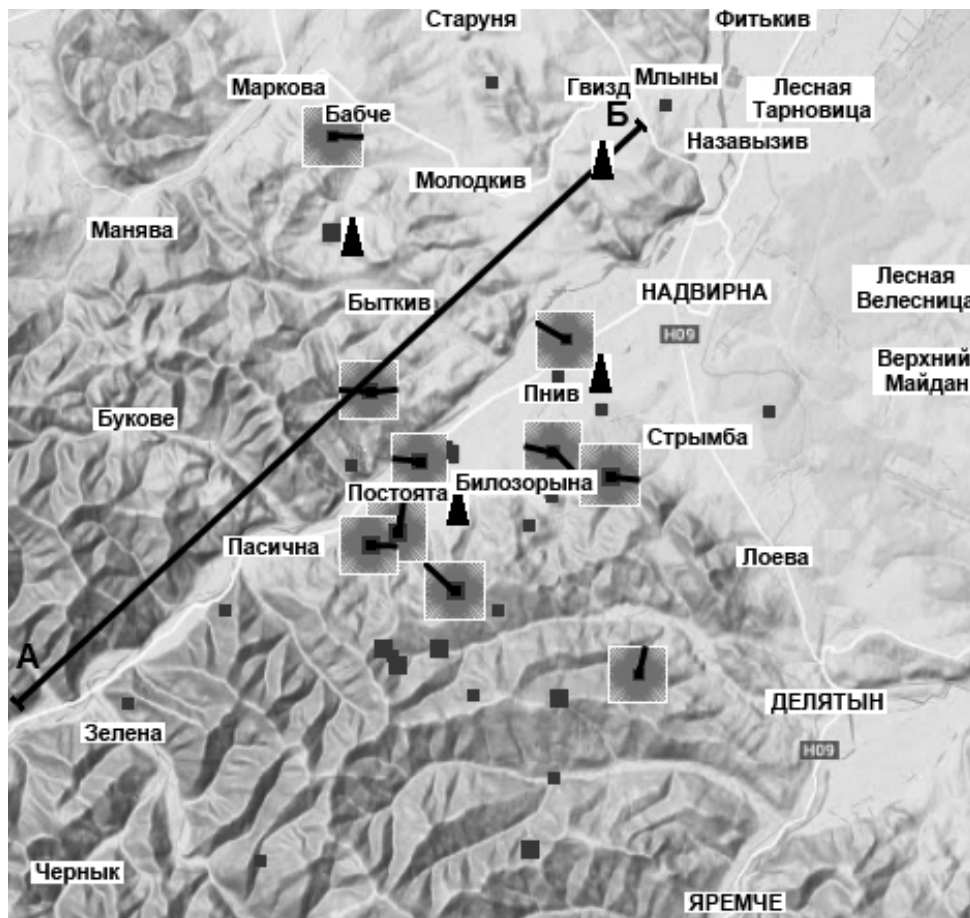


Рис. 2. Землетрясения Надворнянского нефтегазоносного района (Украинское Предкарпатье). Маленькие квадраты — эпицентры землетрясений с  $M < 2$ , большие квадраты — с  $M > 2$ , для ряда очагов указаны направления вспарывания разрывов, ▲ — нефтегазовые месторождения. А–Б — локальный профиль Быстрица — Гвизд (фрагмент) (Крупский, 2001) (геологический разрез и глубинную локализацию очагов землетрясений см. рис. 5). Основа рисунка — изображение GoogleEarth

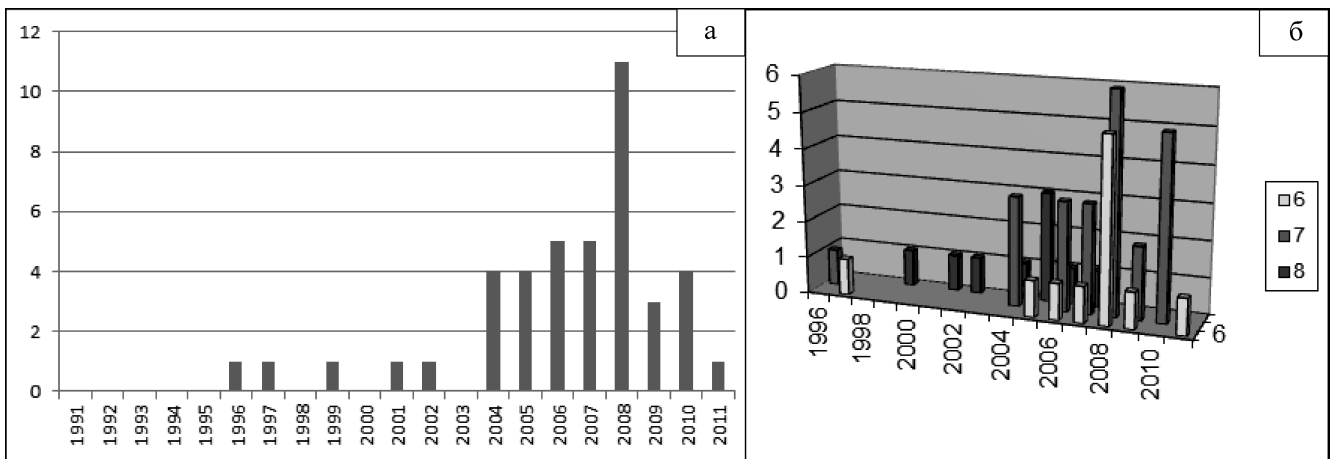


Рис. 3. Активизация сейсмичности Надворнянского нефтегазоносного района во времени: а — годовое количество землетрясений за 1991–2011 гг.; б — то же за 1996–2011 гг. с распределением землетрясений по классу/магнитуде ( $K = 6-6,9/K = 7-7,9/K \geq 8$ )

в познании причин сейсмичности этой территории и в разработке мер по уменьшению сейсмического риска. Кроме уточнения локализации очагов местных землетрясений нами исследованы также особенности кинематики разрывов в очагах, для чего использована модель точечного источника (модель Брюна) (Brune, 1970) и некоторые аналитические соотношения, в том числе установленные нами для

землетрясений Карпатского региона (Назаревич, Назаревич, 2009). Для определения ориентации разрывов использована методика И.В. Горбуновой (1981) с построением азимутальных годографов. Сопоставление всех этих данных с глубинным строением земной коры района исследований выполнено с привлечением данных тектоники (Тектоническая..., 1994), региональных и локальных сейсмических ис-

следований, нефтегазопроисловых работ и бурения (Атлас..., 1998; Крупский, 2001).

Район исследований расположен в юго-западной части Ивано-Франковской области, в пределах Бориславско-Покутской зоны Предкарпатского прогиба (рис. 1, 2). Надворнянский тектонический узел, образованный пересечением Предкарпатского и ортогонального Шопурско-Надворнянско-Монастырецкого разломов, относится к трем крупнейшим узлам в Предкарпатье. По результатам комплексного анализа геолого-геофизических данных Предкарпатский разлом, прослеженный в структурах фундамента, погружен здесь на 4–6 км, перекрыт складками верхних осадочных горизонтов Внутренней зоны Предкарпатского прогиба и краем Береговой скибы — фронтального покрова Скибовой зоны Карпат. Он трассируется по линии Дерезици—Лысовичи—Заречье с амплитудой сброса 2–3 км в юго-западном направлении (под Карпаты) (Крупский, 2001; Тектоническая..., 1994). Надворнянский тектонический узел отображается зоной активных дифференцированных новейших и голоценовых движений, изученных по динамике эволюции грунтовых покровов (Поливцев, 2011).

Именно в этом узле с 1996 г. отмечено начало резкой сейсмической активизации (рис. 2, 3), развивавшейся во времени следующим образом: сначала два слабых ( $K$  порядка 6 и 7) события в 1996 и 1997 гг., затем — серия из более сильных ( $K > 8$ ) событий в 1999, 2001, 2002, 2004, 2006 и 2007 гг., к которой в 2004 г. подключились более слабые ( $K = 7–7,9$ ) и в 2005 г. — еще более слабые ( $K = 6–6,9$ ) землетрясения (по 3–4 в год). К 2011 г. цикл сейсмической активности завершился.

Для исследования особенностей местного сеисмотектонического процесса в первую очередь было проведено уточнение координат и глубин очагов местных землетрясений. Положение гипоцентров землетрясений определялось по разработанным нами раньше методикам с использованием региональных годографов и усредненных невязок для конкретных сейсмостанций и сейсмогенных зон (Назаревич, Назаревич, 2003, 2004) с помощью разработанной С.Т. Вербицким и Ю.Т. Вербицким компьютерной программы «НУРО» методом минимизации невязок времен прихода сейсмических волн на сейсмические станции. При этом использовались также методы статистической «очистки» данных, хорошо развитые в теории и активно используемые в геодезии (Третьяк, 2004) и других областях обработки данных измерений. В итоге положения очагов местных землетрясений настолько хорошо определились, что, несмотря на чрезвычайную сложность и мелкоблоковость строения верхней части коры исследуемого района (Атлас..., 1998; Крупский, 2001; Шеремета и др., 2004), стало возможным однозначно привязать эти очаги к конкретным сейсмогенным разломным структурам. Результирующие невязки по координатам и глубине в подавляющем большинстве случаев не

превышают  $\pm 1$  км, их взвешенные усредненные значения в основном лежат в пределах  $\pm 0,3–0,5$  км. Данные по очагам наиболее сильных из произошедших в районе Надворной землетрясений представлены в таблице.

### Направления распространения разрывов в очагах землетрясений

Важным с точки зрения геомеханики земной коры является определение размеров разрывов в очагах землетрясений, скорости испарывания, накопленного и сброшенного напряжения, среднего смещения по разрыву. Для исследования ориентации разрывов в очагах землетрясений Надворнянского района использована методика И.В. Горбуновой (1981), разработанная на основе представлений об особенностях излучения разрывом сейсмических волн в зависимости от длины и направления движения разрыва в очаге землетрясения. При этом были также учтены особенности распространения в коре региона сейсмического излучения от очагов местных землетрясений, отмеченные нами ранее при исследовании сейсмичности Олесской нефтегазоперспективной площади (сланцевые газ и нефть) на западе Украины (Назаревич, 2013). В результате для 10 землетрясений, приведенных в таблице, построены азимутальные годографы  $\tau = f(A_2^0)$  (рис. 4). Эти годографы имеют по одному или по два максимума, что свидетельствует об одном или о двух направлениях распространения (вспарывания) разрыва от точки его зарождения. По данным об азимутах для  $\tau_{\max}$  и аналитическим формулам (Горбунова, 1981) найдены азимутальные направления распространения разрывов (см. таблицу). Эти направления также показаны на рис. 2 в привязке к эпицентрам соответствующих событий.

Таблица

Координаты, глубины очагов и направления распространения разрывов в очагах наиболее сильных землетрясений Надворнянского района ( $M = 1,7–2,4$ )

Дата	Координаты		Н, км	M	$A_{21}^0$	$A_{22}^0$	Крипекс С
	$\varphi^0$	$\lambda^0$					
07.03.2006	48,56	24,49	6,9	2,4	313		
06.04.2006	48,59	24,54	3,4	2,3	98		
14.07.2006	48,57	24,46	5,5	2,3	98		
18.08.2006	48,67	24,44	5,4	1,9	92		
07.05.2008	48,59	24,52	2	2,1	280	132	
09.09.2009	48,54	24,56	2	1,7	12		–0,01
30.11.2009	48,61	24,45	2,8	2,3	277	90	–0,29
15.10.2010	48,59	24,48	5,2	2,3	280		–0,52
19.11.2010	48,57	24,47	4,7	2,4	10		–0,52
25.05.2011	48,62	24,53	5,3	1,7	10		–0,17

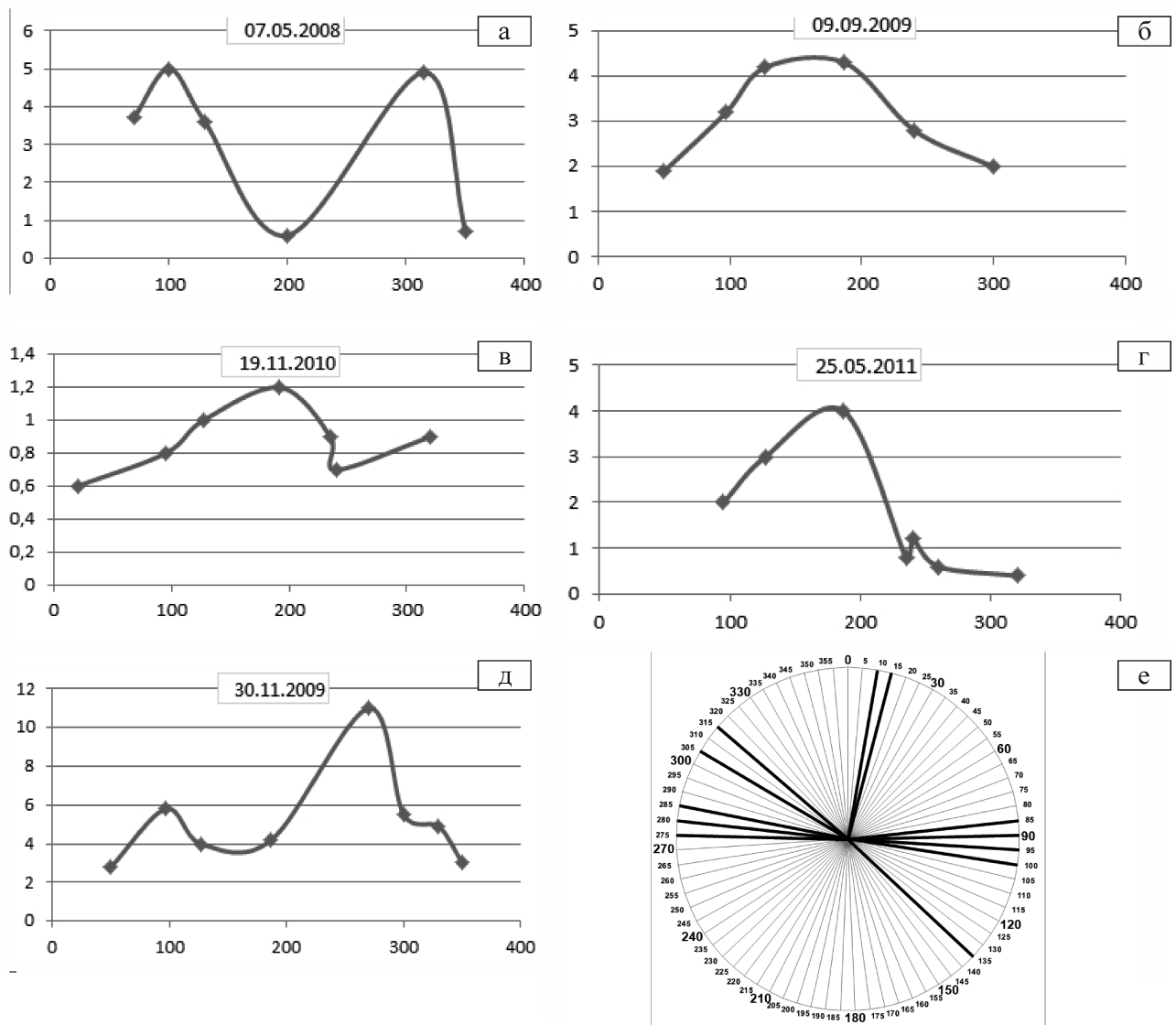


Рис. 4. Азимутальные годографы для некоторых землетрясений Надворнянского нефтегазоносного района (а–д) и сведенная роза-диаграмма направлений вспарывания разрывов в очагах (е)

Направления распространения разрывов исследованных землетрясений имеют характерные азимуты  $277\text{--}313^\circ (\pm 10^\circ)$  (рис. 4), которые попадают в сектор от субширотного западного до практически параллельного Карпатам северо-западного направления и примерно совпадают с простиранием Предкарпатского разлома, и  $90\text{--}98^\circ (\pm 10^\circ)$ , которые имеют близкое к диагональному северо-запад — юго-восточному направлению. Также прослеживается еще ортогональное к предыдущим, субмеридиональное северное направление (азимут  $10\text{--}12^\circ \pm 10^\circ$ ), которое в плане тяготеет к разломам, разбивающим литосферу этого района на отдельные блоки (рис. 2, 4).

Сопоставление параметров очагов землетрясений Надворнянского района с данными по землетрясениям других районов Предкарпатья показало, что направления разрывов в очагах достаточно близки. Так, направления разрывов локализованного северо-западнее Надворнянского района очага землетрясения 2007 г. в поселке Комарно (Львовская

обл.) (Назаревич, 2013), которое реализовалось на Городецком разломе, простирание которого близ-параллельно к Предкарпатскому разлому, были в азимутах  $300 \pm 10^\circ$  и  $80 \pm 10^\circ$ , т.е. достаточно близки к направлениям разрывов в некоторых очагах землетрясений Надворнянского района. Проекции направлений разрывов (азимуты  $320\text{--}330^\circ$ ) землетрясений района Долины (Ивано-Франковская обл., 1976 г.), установленные по особенностям макросейсмического поля, также близки к простиранию Предкарпатского разлома.

Анализ пространственной локализации очагов землетрясений Надворнянского района показал (см. ниже), что у ряда землетрясений они располагаются в юго-восточной части Бориславско-Покутской зоны Предкарпатского прогиба в зонах поверхностей надвигов, разделяющих серии разноглубинных антиклинальных складок-надвигов (Атлас..., 1998; Крупский, 2001; Шеремета и др., 2004). Очаги других землетрясений тяготеют к поперечным разрывным нарушениям, которые делят

земную кору Бориславско-Покутской зоны на Старунский, Бабченский, Битковский, Пасечнянский, Любижнянский, Делятинский блоки (Атлас..., 1998).

Интересным оказалось глубинное соотношение очагов местных землетрясений Надворнянского района и имеющихся здесь залежей нефти и газа. В районе города Надворная расположены Пнивское, Южно-Гвиздецкое, Пасичнянское и Битков-Бабчинское нефтегазоконденсатные месторождения (рис. 2). Глубины, из которых добывают углеводороды, на разных месторождениях колеблются от 2300 до 4400 м (Атлас..., 1998; Крупский, 2001). А очаги землетрясений этого района располагаются на глубинах 2–2,8 км и 4,7–6,9 км (см. таблицу). Таким образом, тектонические напряжения, которые вызывают землетрясения, проявляются или выше зоны ловушек углеводородов, или ниже нее. Эти особенности пространственных соотношений сейсмичности и нефтегазовых ловушек вызвали дополнительный интерес к изучению характера местного сеймотектонического процесса. Этот интерес еще более повысился с учетом того, что для некоторых землетрясений (рис. 2) выявлены два направления вспарывания разрывов, создающие между собой угол, близкий к 180° (что согласуется с механикой очага), но все-таки заметно от него отличающийся. Одним из объяснений этого может быть недостаточно хорошее качество азимутальных годографов (рис. 4), вызванное сравнительно небольшой энергией рассматриваемых землетрясений, а следовательно, и небольшой дальностью (зоной) их надежной регистрации на фоне сейсмических шумов, и наличием в этой зоне небольшого количества сейсмических станций. Другим объяснением может быть реализация разрывов на наклонных плоскостях разломов, надвигов или складок со смещением не вдоль простирания, а под углом к нему (сбросовый, взбросовый и надвиговый механизмы, с возможной косою составляющей). В этом случае, с одной стороны, наличие создающих между собой угол в проекции на горизонтальную плоскость (дневную поверхность) направлений вспарывания разрывов не конфликтует с механикой и геометрией, а с другой — легко может объясняться известными фактами поворота осей напряжений с глубиной и (или) крутизны (угла погружения) плоскости надвигов. Учитывая широкое распространение надвиговых структур в Карпатах в целом и в зоне их сочленения с Предкарпатским прогибом в частности, такое объяснение выглядит естественным, но требует соответствующей проверки.

#### **Приуроченность очагов к разрывным нарушениям земной коры**

Главные особенности строения верхних горизонтов коры Надворнянского района показаны на геологическом разрезе вдоль профиля Быстрица — Гвизд (рис. 5) (Крупский, 2001), при построении

которого использованы данные детальных геологоразведочных работ в этом районе (Атлас..., 1998; Крупский, 2001; Тектоническая..., 1994; Шеремета и др., 2004). Очаги (с уточненными нами координатами и глубинами) практически всех вынесенных на профиль землетрясений приурочены к разноглубинным поверхностям надвигов и складок с разной крутизной погружения (углами падения). Наиболее активна в этом отношении и хорошо трассируется гипоцентрами землетрясений (5 очагов) поверхность, по которой на автохтонные осадочные структуры Предкарпатского прогиба надвигается нижний (Дзвиняч-Рунгурский) покров внутренней зоны прогиба. Причем сейсмоактивная зона приурочена к участку наиболее пологого (близгоризонтального) залегания этой поверхности (к северу от ручья Бухтовец в районе сел Пнив и Гвизд, глубины 4,8–6,2 км). Два из этих землетрясений (южнее с. Пнив) локализируются в области сочленения поверхности надвига с более крутой (ближе к взбросовой) поверхностью надвига Пасичнянской глубинной складки (третий ярус складок) на нижнюю часть Пнивской складки (в теле Дзвиняч-Рунгурского покрова). Очаг еще одного землетрясения располагается примерно на 1 км выше (глубина 4,5–4,8 км) и приурочен к той же более крутой поверхности надвига Пасичнянской складки на Пнивскую. Еще два очага (глубины 2,0 и 2,8 км) располагаются в верхнем этаже сеймотектонической активности. Один из них приурочен к телу складки Глубинная (Битковского покрова) и находится над описанной выше областью сеймотектонической активизации поверхности надвига покровов на автохтон. Другой — на 7,5 км юго-западнее, на взбросовой поверхности надвига складки Газовая (Бухтовецкая) на складку Газовая. Еще юго-западнее, но уже на нижнем этаже активности (глубина 5,8 км) есть еще один очаг, который приурочен к поверхности надвигания верхнего (Майданского) покрова внутренней зоны Предкарпатского прогиба на средний (Битковский) покров. И еще один очаг на промежуточной (3,5 км) глубине (северо-восточная часть профиля, район села Пнив) приурочен к плоскости надвига Пнивской складки на Старунскую. К этому надо добавить, что активность Старунской складки отражает также один из очагов, расположенный на поверхности надвигания ее подошвы на автохтон, локализующийся в узле сочленения этой поверхности с более крутой поверхностью, по которой Старунская складка надвигается (взбросом) на Гвиздецкую. Именно в зоне этой складки неподалеку (примерно на 7 км северо-западнее точки Б профиля) находится известный грязевый вулкан Старуня (в 1907 г. здесь нашли забальзамированное в солевых и нефтяно-озокеритовых толщах тело мамонта, в 1929 г. — длинношерстого носорога и других ископаемых животных), который активизировался после сильного землетрясения в зоне Вранча в 1977 г., извергая (с ослабевшей к настоящему времени интенсивностью) через 7 кратеров

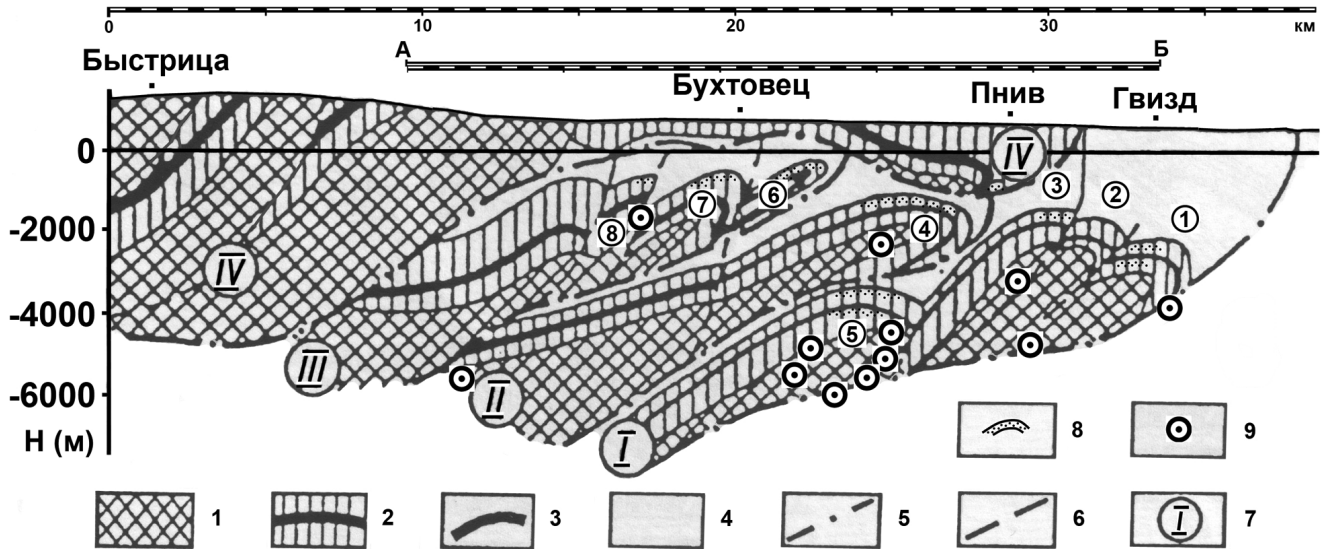


Рис. 5. Приуроченность очагов землетрясений Надворнянского нефтегазоносного района к разломным структурам. Геологический разрез по профилю Быстрица — Гвизд (Крупский, 2001) с дополнениями и детализацией по (Атлас..., 1998) (фрагмент А—Б — см. рис. 2): 1 — меловой флиш; 2 — палеогеновый флиш; 3 — шешорский горизонт и быстрицкая свита палеогена; 4 — молассы неогена; 5 — границы покровов; 6 — надвиги; 7 — покровы: I — нижний (Дзвиняч-Рунгурский), II — средний (Битковский), III — верхний (Майданский) (все три — внутренняя зона Предкарпатского прогиба), IV — Скибовый покров Карпат (Береговая скиба); 8 — залежи углеводородов; 9 — очаги землетрясений, произошедших на расстоянии до 2 км от профиля; цифры в кружках — отдельные складки внутренней зоны Предкарпатского прогиба: 1 — Гвиздецкая; 2 — Старунская; 3 — Пнивская; 4 — Глубинная; 5 — Пасичнянская; 6 — Старая Копальня; 7 — Газовая; 8 — Газовая (Буховецкая)

и 12 микрократеров газ, воду, глинистую пульпу, иногда нефть и озокерит.

В пользу предполагаемых взбросо-надвиговых механизмов большинства местных землетрясений Надворнянского района (реализуемых в условиях сжатия вкрест Карпат, т.е. в направлении юго-запад — северо-восток) с некоторой тангенциальной составляющей восток — юго-восточного направления (см. ниже) говорит (кроме локализации очагов на тектонических структурах коры и преимущественно несовпадающих с простираем в плане задокументированных разрывных нарушений направлений вспарывания разрывов в их очагах) и такой важный и уже немало нами исследованный параметр местных землетрясений, как крипекс (Назаревич и др., 2004, 2007). Так, крипекс произошедших в 2009–2011 гг. четырех землетрясений имеет выраженные отрицательные (от  $-0,17$  до  $-0,52$ ) значения (таблица), которые свидетельствуют о «жестком» (высокочастотном) сейсмическом излучении указанных очагов, что характерно для землетрясений взбросо-надвигового типа, происходящих в условиях сжатия.

В свете изложенного становится понятным подмеченное ранее специфическое соотношение между положением очагов землетрясений и зонами локализации ловушек углеводородов (рис. 5). Землетрясения происходят на разрывных нарушениях (разломах, поверхностях надвигов и складок), окружающих геологические структуры (антиклинальные складки) — ловушки нефти и газа. В самих ловушках таких активных разрывных нарушений нет, иначе скопления углеводородов в них бы не образовались.

#### О геодинамической обусловленности выявленных особенностей сейсмотектонического процесса

Направления распространения разрывов в очагах землетрясений в разных районах Предкарпатья близки между собой, что говорит о преобладающем направлении сейсмоактивных разломов и об общности геодинамического режима, который контролирует напряженное состояние тектоносферы этого региона (Вихоть и др., 2011; Высотенко, 2010; Поливцев, 2011; Free..., 2015). Таким общим фактором, по нашему мнению, является сжатие вкрест Карпатской горной системы, которое зафиксировано, в частности, по геодезическим данным (Демедюк и др., 1998; Марченко и др., 2012; Сомов, 1990; Третьак, Вовк, 2012), а также особенности строения и напряженного состояния коры в полосе Предкарпатского разлома, в зоне влияния которого локализованы гипоцентры исследованных землетрясений. С одной стороны, причиной возникновения рассмотренных нами землетрясений являются тектонические факторы, с другой стороны, «спусковым крючком» для них могут служить дополнительные наведенные техногенные напряжения, вызванные разработками залежей нефти и газа в этих районах (рис. 5). Нефтедобыча на местных месторождениях сопровождалась интенсивной закачкой воды (Атлас..., 1998), что обуславливало изменения гидродинамического режима в активизированных разломных зонах, в том числе за счет дисбаланса между добытым объемом углеводородов и объемом закачанной в породы воды, что перераспределяет существующие напряжения в массивах пород. Анализ литературных данных по 200 место-

рождениям в различных нефтедобывающих районах мира показал (Geomechanical..., 2011; Keranen et al., 2013 и др.), что вероятность возникновения индуцированной сейсмичности возрастает с увеличением глубины залегания и мощности пластов, а также при снижении пористости и проницаемости коллекторов.

Что касается геодинамики и сейсмотектоники исследуемого района, то она определяется общей геодинамикой Карпатского региона и ее геомеханической трансформацией на созданных в процессе многовекового развития тектонических структурах региональной литосферы. В общем особенности региональной геодинамики состоят в следующем (Назаревич, Назаревич, 2002, 2004, 2007; Nazarevych, Nazarevych, 2006). Здесь присутствует общее сжатие (с воздыманием) карпатских структур, обусловленное планетарным плитово-тектоническим процессом в Альпийском поясе Европы — движением на север-северо-восток Африканской плиты и давлением ее на горные структуры Альп, Карпат и Динарид через систему микроплит и террейнов. В частности, на украинский сегмент Восточных Карпат с юго-востока воздействуют тектонические структуры террейнов Алькапы (Паннонская впадина и Чоп-Мукачевская впадина Закарпатского прогиба) и Тисии-Дакии (Апусени, Трансильвания и Солотвинская впадина Закарпатского прогиба) (Лозыняк и др., 2011; Назаревич, Назаревич, 2000, 2002, 2004, 2007; Назаревич и др., 2007; Nazarevych, Nazarevych, 2006). На этот общий процесс накладывается влияние растекающегося астенолита под Паннонией и ротационная (Третяк, Вовк, 2012), т.е. субширотная восточная составляющая движения террейна Алькапа, который своим северо-восточным клином (Чоп-Мукачевская впадина) вдаётся между Тисией-Дакией и Украинскими Карпатами, создавая направленное примерно по нормали к своему краю давление — диагональное северо-восточное в зоне Закарпатского разлома (район Драгово — Межгорье) и более близкое к субширотному в зоне Оашского разлома (район южнее Драгова и до Хуста) (Назаревич, Назаревич, 2004, 2007; Назаревич и др., 2007). Это давление в альпийскую эпоху привело к формированию Украинских Карпат по типу «крокодиловой тектоники» (Назаревич, Назаревич, 2002; Nazarevych, Nazarevych, 2006), а сейчас транслируется через структуры Карпат в район Надворной и аккумулируется в зоне прифронтальных Карпатских надвигов (рис. 7). Здесь оно получает дополнительную северо-восточную составляющую, генерируемую вклинивающимся вдоль зоны Тессейра-Торнквиста юго-восточным краем Западно-Европейской платформы, на что указывают данные о современных движениях земной коры в Карпатском регионе Украины по результатам геодезических и GPS-измерений (Высотенко, 2010) (рис. 6, а). Этот последний процесс унаследован еще от постальпийского этапа, о чем свиде-

тельствуют результаты полевых тектонофизических исследований (Вихоть и др., 2011) (рис. 6, б).

На сложной тектонической структуре Карпат и Предкарпатского прогиба это северо-западное давление трансформируется также в дифференцированные вертикальные движения блоков коры, о чем говорят данные о голоценовых вертикальных движениях в районе Надворной по результатам анализа динамики грунтов (Поливцев, 2011) (рис. 6, в), а также сама структура и морфология рельефа этого и прилегающих районов (рис. 7) (Free..., 2015), которая хорошо отражает особенности тектоники, геодинамики и геомеханики как самого района, так и его окружения. Ведь именно здесь карпатские хребты наиболее близко (на 45–50 км) подходят к юго-западному краю Подольской возвышенности (трассируемому долиной реки Днестр). В результате в этом сечении создается наибольшее сжатие структур Предкарпатского прогиба, дополняемое также и упомянутым вклиниванием с северо-запада вдоль зоны Тессейра-Торнквиста юго-восточной оконечности Западно-Европейской платформы (Высотенко, 2010). Это привело, в частности, к формированию здесь локального серповидного в плане водораздела между долинами рек Быстрицы Надворнянской — Днестра и Прута — Черемоша (рис. 7). В фундаменте прогиба ему соответствует приподнятый Надворнянско-Отынский поперечный блок, активный и в новейшее время; его голоценовые поднятия имеют величину порядка 8–12 м.

Индикатором обусловленных тектоникой и геодинамикой особенностей рельефа этого района является и речная сеть в его обрамлении. Так, протекающее северо-западнее, стекающее с северо-восточного склона Карпат реки Лимница, Быстрица Солотвинская и Быстрица Надворнянская текут в общем на северо-восток к Днестру, имея при этом в субширотной полосе севернее Надворнянского тектонического узла даже практически субмеридиональные участки русел (направление течения на север) (см. простираание долины р. Быстрицы Надворнянской на участке 2б–2в–2г–2д рис. 7), в то время как протекающие восточнее реки Прут и Черемош почти сразу после выхода из Карпат поворачивают с северо-востока на восток и юго-восток, образуя серповидные в плане речные долины (см. простираание долины р. Прут на участке 3а–3б–3в–3г рис. 7). Причем долины северо-восточно-юго-восточного серповидного плана (уже в самих Карпатах, на выходе из гор) характерны и для территории самого Надворнянского района также для левых притоков рек Быстрицы Надворнянской (речки Бухтовец и Биткивчик) и Прута (речки Каменка, Перемыйска, Любыжня) (рис. 2), а западнее — для участка долины р. Быстрицы Солотвинской, что говорит о некоей самоподобности (кластеризации) процессов образования форм рельефа в этом районе.

Еще одним геоморфологическим индикатором наличия в новейшее время зоны сжатия коры



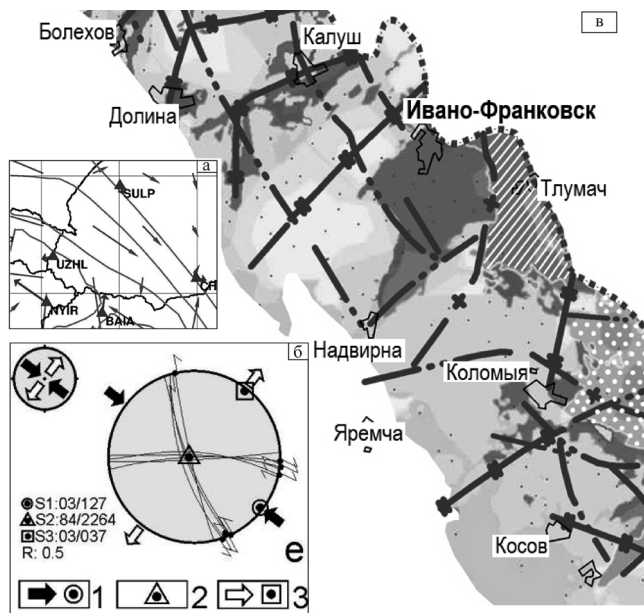


Рис. 6. Особенности геодинамики Карпатского региона Украины: а — современные движения земной коры в Карпатском регионе Украины по геодезическим и GPS-данным (Высотенко, 2010): треугольники — перманентные GNSS-станции, стрелки от них — смещения (локальная составляющая) за период 1995–2007 гг. (в относительном масштабе), другие стрелки — субрегиональные горизонтальные движения в разных зонах Карпатского региона по результатам уравнивания региональной GNSS сети за период 1995–2007 гг.; б — палеонапряжения постальпийского этапа в районе Надворной по полевым тектонофизическим данным (Вихоть и др., 2011) (1 — ось максимального сжатия  $\sigma_1$ ; 2 — промежуточная ось  $\sigma_2$ ; 3 — ось максимального растяжения  $\sigma_3$ ); в — голоценовые вертикальные движения в Предкарпатском прогибе (в районе Надворной), по данным анализа динамики грунтов (Полищев, 2011): светлые зоны — значительные поднятия (8–10 м), темные зоны — слабые поднятия (0–2 м), серые зоны разного тона — средние поднятия (3–7 м), серая зона с белой штриховкой в районе города Тлумач — большие поднятия (13–17 м), серая зона с белым крапом к востоку от города Коломыя — умеренно большие поднятия (11–13 м), показаны основные разломы

в этом районе, трассируемой из района Надворной в близширотном (азимут  $70\text{--}75^\circ$ ) направлении на восток вдоль водораздела р. Быстрица Надворнянская — р. Прут в направлении р. Днестр, является и горизонтальный профиль русла р. Днестр напротив Надворнянского района, на участке городов Галич — Залещики (рис. 7). На рисунке четко видно, что северо-западный участок долины и русла реки (1б–1в–1г) имеет хорошо выраженный меандровый рисунок, соответствующий малому вертикальному уклону русла (слабому течению), вызванному наличием зоны перекрытия створа (зоны сжатия) в районе с. Чернелица (в зоне 1г). Отсюда на 17 км тянется почти прямолинейный участок русла с узким (порядка 0,8 км) каньоном (до метки 1д), на котором р. Днестр прорезает зону сжатия (запруживания), а дальше (юго-восточнее метки 1д) снова проявляется меандровый рисунок долины и русла. Эта особенность отражается и на карте-схеме голоценовых движений (рис. 6, в), где этот район отмечается повышенными (до 11–13 и 13–17 м) поднятиями. Подобная осо-

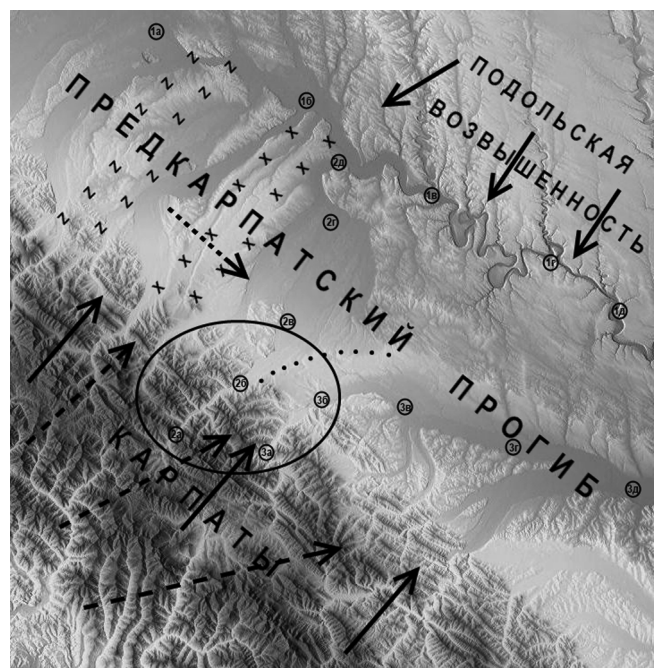


Рис. 7. Рельеф дневной поверхности Надворнянского нефтегазоносного района (обозначенного овалом) и окружающих зон Восточных Карпат, Предкарпатского прогиба и юго-западного края Восточно-Европейской платформы (Подольской возвышенности) (Free..., 2015): цифры в кружках — долины рек (1а–1д — р. Днестр, 2а–2д — р. Быстрица Надворнянская, 3а–3д — р. Прут); —▶ — направления региональных сжимающих напряжений; ■▶ — направления напряжений от зоны контакта террейнов Алькапа и Тисия-Дакция в Закарпатье; ■▶ — направления напряжений от юго-восточной оконечности Западно-Европейской платформы; ●● — водораздел рек Быстрица Надворнянская и Прут в районе Надворной; поперечные поднятия в Предкарпатском прогибе к северо-западу от района Надворной: XXX — Луквицко-Новогутское, ZZZ — Оболоньско-Монастырецкое

бенность характерна и для русла реки Тисы в зоне локального поднятия горстовой структуры Береговского холмогорья в Украинском Закарпатье на участке Вилок (Украина) — Тивадар (Венгрия) (Назаревич, Назаревич, 2000).

Другим индикатором заметного, действующего на протяжении постальпийского времени со стороны Карпат в северо-восточном направлении сжатия структур Предкарпатского прогиба, зажатых между Карпатами и краем Восточно-Европейской платформы, является наличие четко видимых на карте рельефа (рис. 7) северо-западнее района Надворной поперечных простирацию прогиба поднятий. Это Луквицко-Новогутское поднятие, сопряженное в южной части с Гвизд-Дзвинячской морфоструктурой (голоценовые поднятия порядка 8–10 м), и Оболоньско-Монастырецкое поднятие (голоценовые поднятия порядка 7–8 м). Относительные понижения (долины) соответствуют относительно опущенным блокам фундамента в основании прогиба. Вместе эти структуры образуют (в фундаменте) и индицируют (в рельефе) цепь поперечных горстовых и грабеновых структур — так называемый «клавишный» тип тектоники, широко распространенный в разных геодинамически ак-

тивных регионах Земли (это, например, зона Припанионского глубинного разлома в Украинском Закарпатье на границе с Венгрией (Назаревич, Назаревич, 2000), Корякское побережье Чукотки (Яроцкий, 2010), материковое Тихоокеанское побережье США и др.). Унаследованный тип тектоники поперечных простиранию Предкарпатского прогиба поднятий и понижений хорошо просматривается и на карте-схеме голоценовых движений (рис. 6, в).

### Выводы

Подводя итог, можно сделать следующие выводы.

1. Сейсмическая активность Надворнянского района вызвана разрядкой напряжений, генерированных общим геодинамическим процессом в Карпатском регионе Украины.

2. Землетрясения этого района отражают геодинамическую активность имеющихся разноранговых локальных и региональных тектонических структур (в частности, окружающих ловушки-за-

лежи углеводородов разрывных нарушений, поверхностей надвигов и складок) и особенности их геомеханического режима.

3. Непосредственной причиной («спусковым крючком») активизации (индуцирования) местной сейсмичности являются изменения геомеханического и гидродинамического режима разрывных, складчатых и надвиговых структур верхних горизонтов коры этого района, вызванные добычей углеводородов и закачкой воды.

4. Поскольку прослеживается определенная связь локальной сейсмичности Надворнянского района с интенсивностью процессов нефтедобычи на местных месторождениях как во времени, так и по соотношению между очагами землетрясений и горизонтами нефтедобычи в пространстве (в том числе по глубине), изложенные результаты исследований необходимо учитывать при нефтедобыче с целью минимизации ее влияния на активизацию местной сейсмичности и уменьшения геоэкологического риска.

### ЛИТЕРАТУРА

Атлас месторождений нефти и газа Украины. Т. IV. Западный нефтегазоносный регион. Львов: Центр Европы, 1998. 710 с. (на укр. языке).

*Вихоть Ю., Бубняк И., Накапелюх М.* Результаты тектонофизических исследований флишевой толщи Скибового покрова Украинских Карпат в долине р. Быстрица Надворнянская // Геол. журн. 2011. № 2. С. 72–80 (на укр. языке).

*Высотенко Р.О.* Определение скоростей изменений координат постоянно действующих станций и периодически действующих пунктов УПМ ГНСС по результатам спутниковых геодезических наблюдений 1995–2007 годов // Современные достижения геодезической науки и производства. Львов, 2010. С. 37–42 (на укр. языке).

*Горбунова И.В.* Определение протяженности очага и направления разрыва по волновой картине на сейсмограмме // Докл. АН СССР. 1981. Т. 261, № 3. С. 836–839.

*Демедюк М., Заблоцкий Ф., Колгунов В.* и др. Результаты исследований горизонтальных деформаций земной коры на Карпатском геодинамическом полигоне // Геодинамика. 1998. № 1. С. 3–13 (на укр. языке).

*Кендзера А., Пронишин Г., Бень Я.* Сейсмическая опасность Прикарпатья // Тр. НТШ. Т. 1. Львов, 1997. С. 104–113 (на укр. языке).

*Керимов И.А., Гайсумов М.Я., Ахматханов Р.С.* Сейсмичность и технические аварии на объектах нефтяной промышленности Чеченской республики // Вестн. ТГУ. Сер. Естественные и технические науки. 2012. Т. 17. № 3. С. 1026–1030.

*Крупский Ю.З.* Геодинамические условия формирования и нефтегазоносность Карпатского и Волыно-Подольского регионов Украины. Киев: УкрГГРИ, 2001. 144 с. (на укр. языке).

*Лозыняк П.Ю., Назаревич А.В., Назаревич Л.Е.* Неогеновая и современная геодинамика и сейсмичность литосферы Закарпатья // Геодинамика. 2011. № 2 (11). С. 170–172 (на укр. языке).

*Марченко А.Н., Третьяк К.Р., Ярема Н.П.* и др. Поле линейных скоростей и движения земной коры в регионе юго-восточной Европы // Геодинамика. 2012. № 2 (13). С. 18–27 (на укр. языке).

*Назаревич А.В., Латынина Л.А., Назаревич Л.Е.* Геоакустические и деформационные предвестники ощутимых закарпатских землетрясений // Сб. мат-лов междунар. конф. «Уроки и следствия сильных землетрясений». 25–28 сентября 2007 г., Ялта, Крым, Украина. Симферополь, 2007. С. 144–146.

*Назаревич А.В., Назаревич Л.Е.* Геодинамика и особенности сеймотектонического процесса Береговской горстовой зоны (Закарпатье) // Геодинамика. 2000. № 1 (3). С. 131–147 (на укр. языке).

*Назаревич А.В., Назаревич Л.Е.* Глубинные ловушкovo-коллекторские тектонические структуры в литосфере Карпатского региона Украины: природа, происхождение и перспективные ресурсы // Науч. вестн. Ивано-Франковского нац. техн. ун-та нефти и газа. 2002. № 3 (4). С. 10–21 (на укр. языке).

*Назаревич А.В., Назаревич Л.Е.* Расчетные годографы сейсмических волн в гипоцентрии карпатских землетрясений // Вестн. КНУ им. Тараса Шевченко. Геол. 2003. № 26–27. С. 98–103 (на укр. языке).

*Назаревич А.В., Назаревич Л.Е.* Геодинамика литосферы запада Закарпатья по комплексу данных // Геодинамика. 2004. № 1 (4). С. 45–53 (на укр. языке).

*Назаревич А.В., Назаревич Л.Е.* Сейсмичность и геодинамика зоны III (транскарпатского) транспортного коридора (Мукачешо–Свалява–Сколе) // Теоретические и прикладные проблемы геоинформатики. Киев, 2007. С. 159–166 (на укр. языке).

*Назаревич А.В., Назаревич Л.Е.* Масштабно-энергетические корреляционные соотношения для очагов землетрясений Закарпатья: некоторые следствия и энергетическая верификация // Теоретические и прикладные аспекты геоинформатики. Киев, 2009. С. 279–298 (на укр. языке).

Назаревич Л.Е. Сейсмичность Олесской площади: экологические аспекты // Геодинамика. 2013. № 2 (15). С. 250–252 (на укр. языке).

Назаревич Л.Е. Землетрясения района Надвирной (Украинское Предкарпатье) и кинематика их разрывов // Мат-лы XII Междунар. конф. «Геоинформатика: теоретические и прикладные аспекты». 11–14 мая 2015 г., г. Киев. Киев, 2015 (CD) (на укр. языке).

Назаревич Л.Е., Назаревич А.В. Методики уточнения параметров гипоцентров Карпатских землетрясений // Геодинамика. 2004. № 1 (4). С. 53–62 (на укр. языке).

Назаревич Л.Е., Назаревич А.В. Особенности сейсмичности Надвирнянского нефтегазоносного района в Украинском Предкарпатье // Сб. докл. IV Молодежной тектонофизической школы-семинара. Т. 1. М., 2015. С. 210–215.

Назаревич Л.Е., Назаревич А.В., Баштейн Н.В. Крипек землетрясений и его применение в сейсмологии // Мат-лы междунар. конф. «Проблемы оценки сейсмической опасности, сейсмического риска и прогноза землетрясений». Ташкент, 7–8 октября 2004 г. Ташкент, 2004. С. 33–37.

Нестеренко Ю.М. Влияние добычи углеводородов на геофизические процессы и сейсмичность в нефтегазоносном Южном Предуралье // Бюл. Оренбургского науч. центра УрО РАН. 2012. № 1. С. 1–21.

Полищев А.В. Карта вертикальных голоценовых движений Вольно-Подоллии и Предкарпатья // Геодинамика. 2011. № 1 (10). С. 58–70 (на укр. языке).

Сомов В.И. Современная направленность развития тектонических структур Карпато-Балканского региона // Геофиз. журн. 1990. Т. 12, № 6. С. 39–47.

Тектоническая карта Западного нефтегазоносного региона Украины. Львов: УкрГГРИ, 1994.

Третьяк К.Р. Оптимизация кинематических геодезических сетей: Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.24.01; Нац. ун-т «Львовская политехника». Львов, 2004. 36 с. (на укр. языке).

Третьяк К.Р., Вовк А.И. Исследование динамики горизонтальных движений земной коры Европы по данным GNSS наблюдений (2000–2010 гг.) // Геодинамика. 2012. № 2 (13). С. 5–17 (на укр. языке).

Шеремета П., Стародуб Ю. и др. Лопушнянское нефтегазовое месторождение в форланде Украинских Карпат // Геолог Украины. 2004. № 1. С. 48–53 (на укр. языке).

Яроцкий Г.П. Разломно-блоковая тектоника литосферы северо-восточной части Тихоокеанского побережья Евразии как источник землетрясений на юго-западе Корякского нагорья // Геодинамика. 2010. № 1 (9). С. 28–36.

Brune I.V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // Geophys. Res. 1970. Vol. 75, N 26. P. 4997–5009.

Free Relief Layers for Google Maps (2015) // URL: <http://www.maps-for-free.com>

Geomechanical study of Bowland Shale seismicity // Cuadrilla Resources. 02.10.2011.

Keranen K.M., Savage H.M., Abers G.A., Cochran E.S. Potentially induced earthquakes in Oklahoma, USA: Links between wastewater injection and the 2011 Mw 5.7 earthquake sequence // Geology. 2013. Vol. 41. P. 699–702.

Nazarevych A., Nazarevych L. Modern and alpine geodynamics of Ukrainian Carpathians (multi-tier «crocodile» or «shaking hand» and «fir-tree» tectonics) // Proc. XVIIIth Congress of the Carpathian-Balkan Geological Association. September 3–6, 2006, Belgrade, Serbia. Belgrade, 2006. P. 399–401.

## SEISMICITY AND SEISMOTECTONICS OF NADVIRNA OIL AND GAS AREA (UKRAINIAN PRECARPATHIANS)

L.E. Nazarevych, A.V. Nazarevych

Analysis of peculiarities of seismotectonic process in Nadvirna oil and gas area (Ukrainian Precarpathians) is presented. Refinement of local earthquakes foci localization was realized using techniques which was developed by the authors in previous years; identifying directions of rupture formation in the earthquakes sources was realized using azimuth locus. Fitting of local earthquakes sources with the different deep thrusts sliding surfaces which surround the folds with the traps (deposits of hydrocarbons) was revealed. A good indicator of the predominant (realized in the stress conditions) thrust focal mechanisms and appropriate «hardness» of their radiation is a pronounced negative (around  $-0,5$ ) cripex of these earthquakes. Directions of rupture formation in the local earthquakes sources indicate the current stress-strain state of crustal structures in this area, which is caused by geodynamic processes in the Carpathian region of Ukraine. The sublatitudinal compression predominates here which is caused on the one hand, by translated through folded Carpathians (in the north-east direction) the differential stress from structures of Alkapa and Tissa-Dacia terranes in the Transcarpathian Depression, and on the other hand, by wedging from the west — northwest the edge of Western European Platform, which wedge to east — southeast along the Teisseyre-Tornquist zone. Induction of activation of the local seismicity in the 1996–2011 was caused by the change of stress in the crust and the hydrodynamics of fluids in the fault zones in connection with the oil and gas production, water injection and others.

*Key words:* seismicity, seismotectonics, Nadvirna oil and gas area, Precarpathians, Ukraine.

**Сведения об авторах:** Назаревич Леся Евстахиевна, канд. геол. наук, науч. сотр. отдела сейсмичности Карпатского региона Ин-та геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины; *e-mail:* nazarevych.l@gmail.com; Назаревич Андрей Владимирович, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. отдела методов сейсмотектонических исследований Карпатского отделения Ин-та геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины; *e-mail:* nazarevych.a@gmail.com