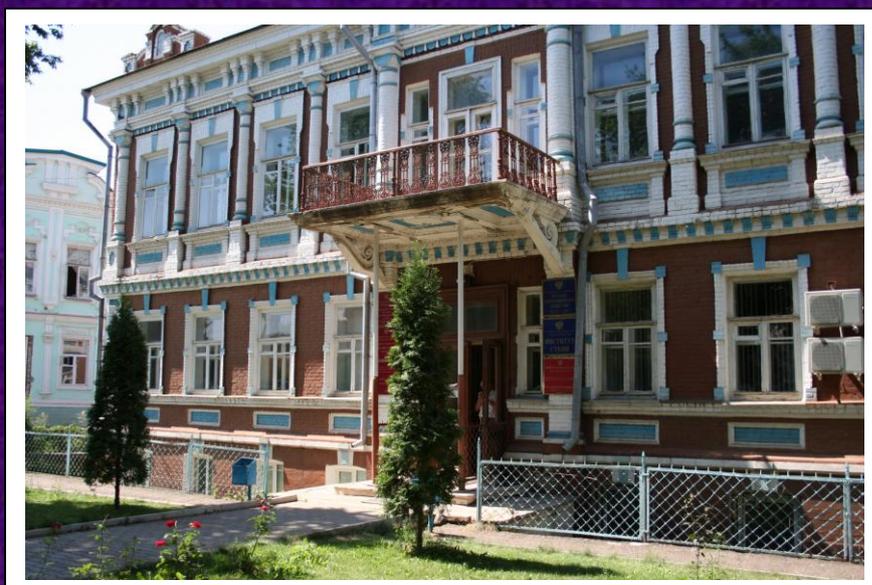


ISSN 2304-9081

Учредители:
Уральское отделение РАН
Оренбургский научный центр УрО РАН

Бюллетень
Оренбургского научного центра
УрО РАН
(электронный журнал)



2012 * № 1

On-line версия журнала на сайте
<http://www.elmag.uran.ru>

© Ю.М. Нестеренко, М.Ю. Нестеренко, 2012

УДК 550.348

Ю.М. Нестеренко, М.Ю. Нестеренко

ВЛИЯНИЕ ДОБЫЧИ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И СЕЙСМИЧНОСТЬ В НЕФТЕГАЗОНОСНОМ ЮЖНОМ ПРЕДУРАЛЬЕ

Отдел геоэкологии Оренбургского научного центра УрО РАН, Оренбург, Россия

Цель: Исследовать влияние интенсивной добычи нефти и газа на геодинамику верхней части земной коры и ее сейсмичность. *Материалы и методы.* Разработаны принципы сейсмического мониторинга недр в районах разработки месторождений углеводородов (УВ). Создана сеть сейсмических станций, обеспечивающих непрерывный сбор сейсмических данных с централизованной системой их сбора. Разработана адаптированная методика их обработки и анализа. Имеется 7-летний период наблюдений за сейсмической активностью недр в Южном Предуралье. Уточнено геологическое строение района исследований. *Результаты.* Выявлено многократное увеличение сейсмической активности верхней части земной коры в районах разрабатываемых месторождений УВ. Сейсмические события приурочены к разломам в земной коре разного порядка. Разработана методика картирования сейсмической активности недр нефтегазоносных районов. Составлена карта сейсмической активности недр юго-западной части нефтегазоносного Южного Предуралья. *Заключение.* Разработка месторождений углеводородов сопровождается падением пластового давления на площадях в тысячи квадратных километров и на глубины до десяти километров. Изменения в пластовом давлении обуславливают изменения в геодинамических процессах верхней части земной коры, сопровождающиеся повышением сейсмической активности. Рассмотрены методологические основы комплексного исследования и мониторинга природно-техногенной сейсмической активности недр разрабатываемых месторождений углеводородов.

Ключевые слова: земная кора, геологическое строение, сейсмические станции, сейсмическое событие, геодинамика, гидро-геодинамика, картирование.

Yu. M. Nesterenko, M.Yu. Nesterenko

THE GEOPHYSICS PROCESSES AND SEISMICITY WITHIN OIL & GAS PRODUCTION ON THE EXAMPLE OF OIL & GAS BEARING SOUTH URAL

Department of Geoecology of Orenburg Scientific Centre UrB RAS, Orenburg, Russia

Objective: To investigate the geophysics processes and seismicity within oil & gas intensive production. *Materials and methods.* The principles of seismic monitoring in oil & gas bearing areas are developed. A network of seismic stations and real-time seismic data gathering system are built. Developed an adapted method of data processing and analysis. Have collected 7-years subsoil monitoring of seismic activity in Southern Ural. Clarified the geology of the study area. *Results.* Revealed multiple increase seismic subsoil within oil & gas production. Seismic events are associated with different order fractures in the crust. The method for mapping seismic subsoil oil & gas bearing regions is developed. A map of the seismic subsoil southwest part of the Southern Ural. *Conclusion.* Production of hydrocarbon reservoir pressure accompanied by a decrease in the area of thousands of square kilometers, and at a depth of ten kilometers. Changes in reservoir pressure cause changes in the geodynamic processes in the upper crust, accompanied by increased seismic

activity. The methodological basis of a comprehensive research and monitoring of changing of geophysics and geodynamic processes in the crust on the territory of hydrocarbon deposit areas under development.

Key words: crust, geology, seismic stations, seismic event, geodynamics, hydro-geodynamics, mapping.

Введение

Интенсификация добычи нефти и газа в крупных нефтегазоносных районах обуславливает изменения в природной (геологической) среде, в том числе значительную перестройку гидрогазодинамических и геодинамических процессов в земной коре на глубины до десяти и более километров на площадях до нескольких десятков тысяч квадратных километров, создавая условия возникновения ряда экологических проблем, существенно влияющих на развитие природы и качество жизни населения в регионе. В результате в крупных нефтегазоносных районах развиваются опасные физико-геологические и техноприродные процессы, обуславливающие повышение сейсмической активности с непредсказуемыми последствиями. Решение этой проблемы возможно на основе междисциплинарного комплексного исследования процессов, идущих в недрах под влиянием добычи углеводородов (УВ) с использованием ряда научных дисциплин - математики, физики, геологии, гидрогеологии и гидравлики, учений о техногенезе, учета технологических процессов и многого другого. В основном лишь на стыке наук возможно эффективное решение поставленных задач по изучению техногенеза в недрах. Познание этих процессов позволит ответить на многие вопросы по повышению безопасности добычи нефти и газа, их транспортировке трубопроводным транспортом, обеспечению безопасности населения и его деятельности в регионе. Сложность проблемы заключается в охвате техногенезом больших объемов верхней части сложной по строению и естественной динамике земной коры.

В основу решения геоэкологических проблем, обусловленных добычей углеводородов, положены результаты исследования природно-техногенных изменений геофизических и геодинамических процессов в районах разрабатываемых нефтегазовых месторождений Южного Предуралья и выявление геофизических, геодинамических и других индикаторов техногенной трансформации геологической среды.

Материалы и методы

В результате интенсивной эксплуатации месторождений газа и нефти в связи с уменьшением пластового давления значительно нарушаются природные геофизические и соответственно геодинамические равновесия в содержащей их геологической среде и прилегающих системах подземных вод. Это ведет к формированию опасных геодинамических процессов и многократному увеличению количества и интенсивности сейсмических событий в районах добычи нефти и газа. Спровоцированные добычей углеводородов землетрясения уже произошли и происходят при разработке газа и нефти в районе Газли в 1976 и 1984 гг. (интенсивностью 7 баллов), в Западной Сибири, на ряде месторождений США (месторождения нефти Rangely, Mukawa), Канады (месторождения Strachan, Eagle&Eagle Wes) и других регионах. В Татарстане в настоящее время происходит 1-2 землетрясения в год интенсивностью 3 и более баллов. По данным наших исследований, на разрабатываемых месторождениях нефти и газа в Южном Предуралье фиксируется в среднем 2-3 сейсмических события в месяц с магнитудой M_l 1 - 2 и более, что на порядок больше, чем за пределами месторождений.

Техногенные изменения в недрах Земли в платформенных условиях при добыче углеводородов протекают относительно быстро в сравнении с естественной геодинамикой и, как правило, имеют отдаленные последствия. Изменения в гидро-газодинамике обуславливают соответствующие мало исследованные техногенные изменения в геодинамике твердой части земной коры. Их последствия могут привести к крупнейшим техногенным катастрофам и чрезвычайным ситуациям: землетрясениям, провалам земной поверхности, изменениям в балансе и качестве подземных вод зоны активного водообмена.

Формирование и эволюция напряженно-деформированного состояния, геофизических процессов и сейсмичность земной коры определяются ее строением, естественной динамикой и совокупностью воздействий на геологическую среду. В связи с этим нами выполнен анализ геологического строения и геодинамики верхней части земной коры Южного Предуралья, уточнена ее геодинамическая модель и проанализировано напряженно-деформированное состояние, в значительной мере определяющие реакцию геологической среды на техногенные воздействия.

Неоднородность строения земной коры приводит к неоднородному распре-

делению напряжений и к их концентрации в местах контактов блоков. Медленные деформации земной коры, вызываемые природными и техногенными причинами, приводят к подвижкам по поверхности контактов. В результате происходит сброс напряжений и выделение сейсмической энергии. Выяснение конкретных причин их возникновения предполагает познание особенностей геологического строения территории в плане его исторического становления.

Исследуемый регион Южное Предуралье по многим параметрам является пограничным, что объясняет особую сложность его строения. Он объединяет юго-восточную часть Восточно-Европейской (Русской) платформы, северный борт Прикаспийской впадины и Предуральский краевой прогиб.

Кристаллический фундамент Южного Предуралья (рис. 1) имеет густую сеть разломов, согласованную с блоковой структурой земной коры региона, которые часто прослеживаются на земной поверхности в виде речных долин, водоразделов, оврагов и др.

Изученность аномалий геофизических полей, с учетом данных бурения структурных и параметрических скважин, позволила выделить в пределах Волго-Уральской антеклизы множество разноориентированных разломов 1-го, 2-го и 3-го порядков, участвующих в формировании ряда структур I порядка (Татарский и Жигулевско-Оренбургские своды, Серноводско-Абдулинская впадина) и многочисленных гряд-останцов структур III порядка (Домосейкинская, Жуковско-Донская, Спиридоновско-Пойменная и других). Средняя протяженность раннепротерозойских разломов достигает 300-800 км.

Наряду с субмеридиональными нарушениями прослеживаются диагональная и поперечная системы сдвигов (1ф,2ф,4ф), а также ряд мелких поперечных разломов, распадающихся на отдельные отрезки длиной 10-100 км. Возникновение этой системы сдвигов, судя по морфологии ранних разломов, относится к более позднему этапу развития, которые хоть и осложняют внутреннюю структуру фундамента, но, по-видимому, не участвуют в тектонических движениях при формировании палеоструктур в техногенно ненарушенных условиях.

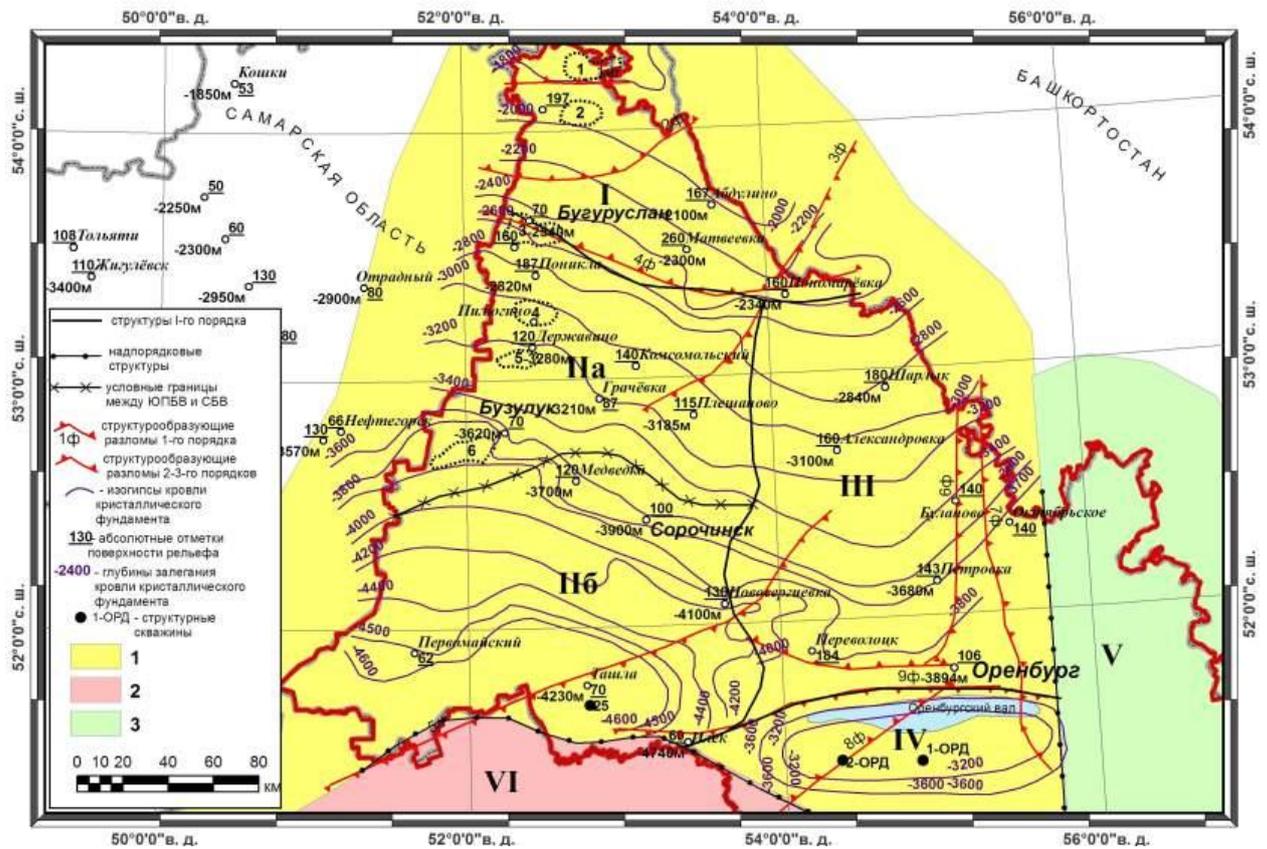


Рис. 1. Уточненная карта-схема кристаллического фундамента юго-восточного склона Волго-Уральской антеклизы (составлена автором с использованием данных Коноваленко, ООО «Газпром добыча Оренбург», ОренбургНИПИнефть, А.Г. Соколова, В.С. Дубинина).

Структурные элементы по классификации Н.С. Шатского: надпорядковые – Волго-Уральская антеклиза 1, Прикаспийская синеклиза 2, Предура́льский краевой прогиб 3; 1-го порядка – Южный склон Татарского свода I; Бузулу́кская впадина: северный борт Бузулу́кской впадины IIа, южное погружение Бузулу́кской впадины IIб; Восточно-Оренбургский свод III, Соль-Илецкий свод IV; 2-го порядка – Оренбургский вал IV₁; 3-го порядка гряды-останцы: Домосейкинская-1; Таткандызская-2; Кирюшкинская-3; Исуковско-Донская - 4; Гремячевско-Ольховская-5; Спиридоновско-Пойменная-6.

Таким образом, рифейско-вендский цикл тектогенеза вызвал заложение в Волго-Уральской антеклизе ряда зон anomalно напряженных растяжений и сжатий между структурными системами.

Осадочный чехол в северо-западной части Южного Предура́лья представлен отложениями палеозойских и мезокайнозойских образований общей мощностью 3 – 5 км (рис.2). В восточной, южной и северной частях кристаллический фундамент перекрыт протерозойско-палеозойскими отложениями мощностью от 2,5 до 6 км (Пантелеев, 1997). Почти повсеместно в пределах Оренбургского свода в разрезе отсутствуют рифейско-вендские отложения. В запад-

ной и северной наиболее приподнятых его частях из разреза местами выпадают низы девонских отложений (Соколов, 2010).

Осадочный чехол, являясь частью земной коры, служит в основном передаточным звеном эндогенных природных землетрясений, а в условиях техногенного нарушения его структуры и геодинамики он становится источником техногенных землетрясений, часто значительной силы.

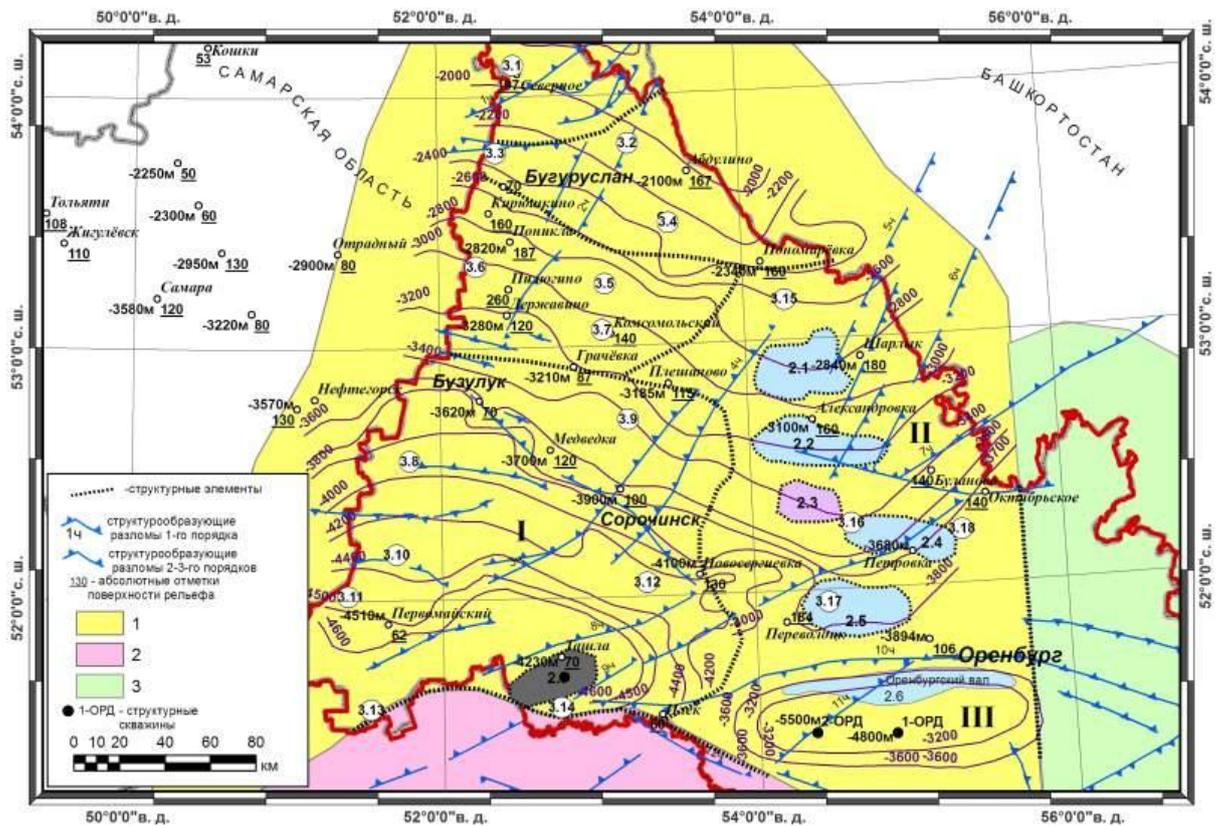


Рис. 2. Схема разломов осадочного чехла Волго-Уральской антеклизы (составлена автором с использованием данных Коноваленко, ООО “Газпром добыча Оренбург”, ОренбургНИПИнефть, А.Г. Соколова).

Структурные элементы по классификации Н.С. Шатского: надпорядковые – Волго-Уральская антеклиза – 1, Прикаспийская синеклиза – 2, Предуральский краевой прогиб – 3; 1-го порядка – Бузулулукская впадина I; Юго-восточный краевой блок Жигулёвско-Оренбургского свода II; Урало-Сакмарский прогиб III. Структуры 2-го порядка: Шарлыкский выступ – 2.1, Калгано-Каргалинский выступ – 2.2, Астрахановский выступ – 2.4, Донецко-Сыртовский выступ – 2.5, Ташлинская депрессия – 2.7, Адамовское поднятие – 2.3. Структуры 3-го порядка: Домосейкинская – 3.1, Исайкинская – 3.2, Саврушинская – 3.3, Северобольшикинельская – 3.4, Боровско-Злеская – 3.5, Городецко-Жуковская – 3.6, Петрохерсонская – 3.7, Бобровская – 3.8, Покровско-Сорочинская – 3.9, Гаршинско-Ефимовская – 3.10, Зайкинско-Росташинская – 3.11, Акъярско-Лебяжинская – 3.12, Тепловско-Уральская – 3.13, Бородинская – 3.14, Алябьевско-Романовская – 3.15, Колганская – 3.16, Землянско-Сыртовская – 3.17, Ольшанская – 3.18

В осадочном чехле Южного Предуралья весьма рельефно выражена лишь

Жигулевская структура, а Оренбургская как положительная структура четко не прослеживается и представляет собой замкнутую моноклираль. Осадочный чехол в Предуральском краевом прогибе осложнен многочисленными флексурами, валлообразными и антиклинальными поднятиями, которые согласуются с тектоническими нарушениями в кристаллическом фундаменте. Прогиб заполнен мощной толщей пермских отложений, в нём отмечаются диапировые структуры и прочие проявления соляной тектоники.

В разрезе осадочного чехла уверенно выделяются три структурных этажа: верхнепермско-четвертичный (надсолевой), кунгурский (солевой) и среднедевонско-артинский (подсолевой).

По условиям залегания, типу геологического разреза и истории геологического развития в осадочном чехле территории Южного Предуралья выделяются структурные элементы различных порядков.

Для оценки опасности техногенных землетрясений в районах нефтегазодобычи значительный интерес представляет соленосный ярус и техногенные воздействия на него. Мощное проявление солянокупольной тектоники является одной из специфических особенностей геологического строения Прикаспийской синеклизы и Предуральского краевого прогиба. Мощные отложения солей оказывают большое влияние на сейсмическую активность осадочного чехла в естественном и, особенно, нарушенном добычей нефти и газа состоянии.

Наиболее важной особенностью строения структур чехла является их значительная дискретность с формированием сложной сети продольных (2ч, 3ч-8ч) и поперечных разломов (1ч, 9-12ч). Сравнительный анализ пространственных соотношений древних протерозойских разломных систем свидетельствуют об их сложных неоднозначных взаимосвязях (Валеев, 1977). С одной стороны, отдельные разломные сегменты платформенного чехла наследуют предшествующие зоны орогенных разломов, т.е. являются долгоживущими (№ 5ф-8ч, 10ч, 7ч, 4ф, 10ч). С другой стороны, ряд древних протерозойских (орогенных) разломов не подтверждаются данными аэрогравимагнитных съемок (1ч-6ч, 9ч, 11ч, 12ч), т.е. являются полностью залеченными.

Уточненные сведения о геологии района исследований позволяют идентифицировать сейсмические события с теми или иными геологическими структурами, геофизическими, гидрогеологическими и геодинамическими процессами в них в естественных и техногенно измененных условиях.

К исследованию техногенных изменений в недрах разрабатываемых месторождений УВ принято нефтегазоносное Южное Предуралье. Здесь расположено самое крупное в Европе Оренбургское нефтегазоконденсатное месторождение (ОНГКМ) с добычей до 40 млрд. м³ газа в год и множество (более 120) разрабатываемых месторождений нефти с добычей до 20 млн. тонн в год. Поэтому в этом районе сформировалось сильнейшее техногенное воздействие на геологическую среду.

Методология разработана на примере Южного Предуралья, которое находится в пределах Восточно-Европейской платформы, охватывает Волго-Уральскую антеклизу, северный борт Прикаспийской впадины и Предуральский краевой прогиб и является типичным для многих нефтегазоносных районов. Геофизические процессы и сейсмичность Южного Предуралья практически не изучены, так как регион охватывает платформенные районы, которые традиционно относили к геофизически малоактивным и слабосейсмичным (Гаев, Хоментовский, 1982; Гаев и др., 1983). Поэтому основное внимание, с точки зрения оценки геофизических процессов и реальной сейсмической опасности, уделялось активным горно-складчатым сооружениям. Однако в последние годы интерес к их изучению в условиях платформенных областей значительно возрос после того, как обнаружилось, что платформы достаточно подвижны, особенно вблизи складчатых областей (Юдахин, 2008, Кутинов, 2001 и др).

В пределах платформ неоднократно наблюдались землетрясения интенсивностью до 8 баллов: 16.06.1976 г. – на Южно-Китайской платформе с $M=7,8$; 19.04.1935 г. – на Северо-Африканской платформе (Ливийское) с $M=6,5$; 10.12.1967 г. – на Индостанской платформе (Койна) с $M=6,5$; 16.11.1920 г. – на Северо-Американской платформе (Канадский щит) с $M=6,8$.

Анализ каталогов землетрясений, зарегистрированных существующими сейсмологическими сетями, указывает также на высокую сейсмичность Восточно-Европейской платформы (Новый каталог..., 1977; Никонов, 1999). Восточно-Европейская платформа характеризуется высокой геофизической и сейсмической активностью, особенно на стыках крупных геологических структур.

В наших исследованиях за основу принята блоково-слоистая модель земной коры. Такой же модели придерживаются исследователи ряда других платформенных территорий (Архангельская и Саратовская области).

Природная динамика осадочного чехла определяется главным образом

динамикой кристаллического фундамента, и ее анализ требует рассмотрения земной коры как единой системы. Блоково-разломная структура земной коры и пликвативные и дизъюнктивные дислокации осадочного чехла закладываются на ранних этапах дробления фундамента.

В основу методологии исследования и мониторинга геофизического и напряженно-деформированного состояния недр нефтегазоносных районов в условиях техногенного воздействия на нее нами принят комплексный подход, учитывающий взаимовлияние геологических структур, динамики гидрогеосистемы, добычи полезных ископаемых и напряженно-деформированного состояния среды. Сравнительный анализ геологического строения, системы разломов, динамики подземных вод, напряженности и сейсмичности позволяет районировать территорию региона по геофизической и сейсмической активности (рис. 3). Комплексный подход ориентирован на теоретическое обобщение и дальнейшее развитие представлений о взаимодействиях в системе геологическая среда - гидрогеосистема - напряженно-деформированное состояние (НДС) и сейсмичность верхней части земной коры в условиях техногенеза.

- создания сети сейсмических станций и мониторинга геофизическо и сейсмической активности недр в районах разрабатываемых месторождений углеводородов;
- выявления зон повышенной геодинамической активности и районирования территории;
- разработки геоинформационной системы и базы данных сейсмических событий, геологического строения, техногенных нарушений, инженерных и промышленных объектов территории исследований;
- распознавания и обработки техногенных и природных сейсмических событий по записям сейсмических станций;
- моделирования сейсмической активности территории исследований во времени;
- геофизического и сейсмического районирования нефтегазоносных районов;
- моделирование техногенных геодинамических процессов Южного Предуралья и выявление геофизических индикаторов техногенных трансформации геологической среды в районах добычи нефти и газа

- моделирования развития гидродинамических воронок в подземных водах на разрабатываемых месторождениях нефти и газа;
- исследования прогнозных параметров сейсмической активности районов добычи нефти и газа;
- выявления техногенных изменений в геодинамике верхней части земной коры и их последствий;
- выявления закономерностей влияния добычи нефти и газа на напряженно-деформированное состояние и сейсмичность недр в районах недропользования;
- контроля техногенных изменений в динамике земной коры на разрабатываемых месторождениях углеводородов путем создания геодинамических полигонов с использованием сейсмического мониторинга.



Рис. 3. Методика геодинамического районирования нефтегазоносных областей.

На основе построенной и наполненной базы данных реализован ряд математических моделей, описывающих геофизические и геодинамические процессы в земной коре районов добычи нефти и газа Южного Предуралья.

В результате интенсивной эксплуатации месторождений нефти и газа в связи с уменьшением пластового давления значительно нарушается природное динамическое равновесие в пластовых водах и прилегающих водоносных горизонтах и формируются значительные техногенно обусловленные их перетоки в зоны понижения пластовых давлений.

На гидродинамический режим подземных вод, их реакцию на техногенные воздействия и участие в геодинамических процессах земной коры существенное влияние оказывают структурные особенности осадочной толщи и водно-физические свойства водоносных горизонтов и их водоупоров.

В толще осадочных пород Южного Предуралья с точки зрения формирования подземных вод выделяются три структурных этажа: верхнепермско-четвертичный (надсолевой), кунгурский (солевой) и среднедевонско-артинский (подсолевой). Сульфатно-галогенные отложения делят водную систему на два этажа: верхний – зону активного водообмена, и нижний (подсолевой) - с весьма замедленным водообменом.

При изучении геоэкологических проблем, связанных с преобразованием напряженно-деформированного состояния толщ и блоков горных пород в районах эксплуатации нефтяных и газоконденсатных месторождений, обычно не учитывается состояние гидрогеологических систем, их динамика и фактор времени. На фоне общего планетарного и локального развития рассматриваемых блоков земной коры, имеющих историю развития в миллиард и более лет, и продуктивных толщ, сформировавшихся за последние сотни или десятки миллионов лет, произошли локальные техногенные преобразования палеокарстовых порово-трещинных пород продуктивных толщ в объеме до 5000 км³ и более в течение последних 40-70 лет, которые привели к изменению пластовых давлений, химического состава подземных вод, структуры порово-трещинного пространства и характера геодинамических и сейсмических процессов.

Изменения в нефте- и газоносных горизонтах, их водоносных системах приводят к геоэкологическим изменениям в зоне активного водообмена, в динамике тепловых и газовых эманаций недр, формированию потоков законтурных пластовых вод за счет падения пластовых давлений (Дюнин, 2000, Нестеренко Ю.М., Глянцев, 2007).

В связи с неоднородностью фильтрационно-емкостных свойств по вертикали и латерали горных пород, на месторождениях наблюдается нестабиль-

ность скорости снижения давления и уровней пластовых вод и формирования зон обводнения по площади, по разрезу и во времени. Добыча УВ на ОНГКМ обусловила падение их давления на 10 МПа и более, обводнение скважин, образуя при этом гидродинамическую воронку (рис. 4). Эта воронка постепенно нейтрализуется латеральными и вертикальными притоками воды, расширяя зону влияния разработки месторождений на геологическую среду.

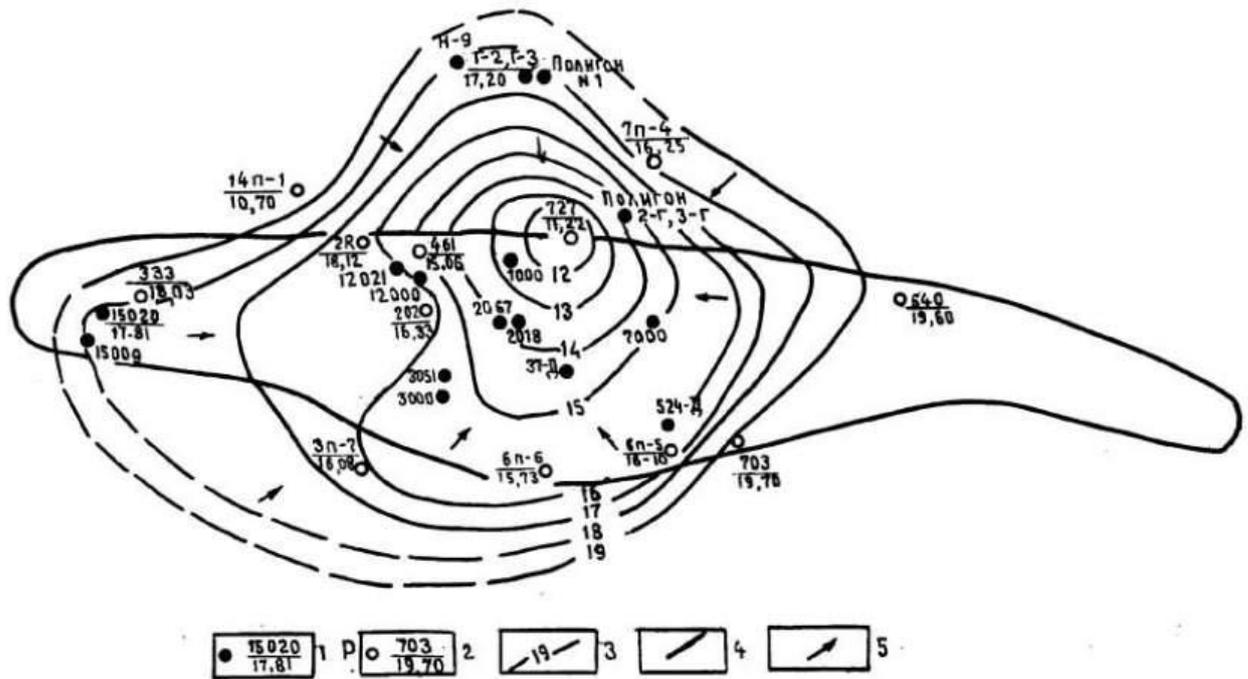


Рис. 4. Формирование депрессионной воронки и распространение пластовых вод в недрах в районе ОНГКМ на 01.09.2004 г. (по данным О.М. Севастьянова, 2004)

1 – поглощающие скважины: сверху – номер скважины; внизу – пластовое давление; приведенное к отметке газожидкостного контакта (-1750 м); 2 – пьезометрические скважины: сверху – номер скважины; внизу – пластовое давление, приведенное к отметке газожидкостного контакта (-1750), МПа; 3 – изобары в водонапорной системе района ОНГКМ; 4 – контуры ОНГКМ; 5 – направление движения потоков пластовых вод в водонапорной системе

Влияние техногенного воздействия на месторождении на водную систему зафиксировано также путем измерения уровней вод в скважинах.

К настоящему, времени по нашим исследованиям и данным Оренбург НИ-ПИгаз, в водонапорной системе ОНГКМ сформировалась депрессионная воронка мощностью до 500-600 м и зона ее влияния простирается на 20 км и более к северу и к югу от контура газоносности (рис. 4). По-видимому, по линиям и трещинам в геологических структурах техногенные изменения давлений в водоносных горизонтах распространяются значительно дальше осред-

ненного контура сформировавшейся гидродинамической воронки. Это косвенно подтверждается повышением сейсмической активности вдоль ряда разломов и других нарушений однородности в геологической среде (рис. 5).

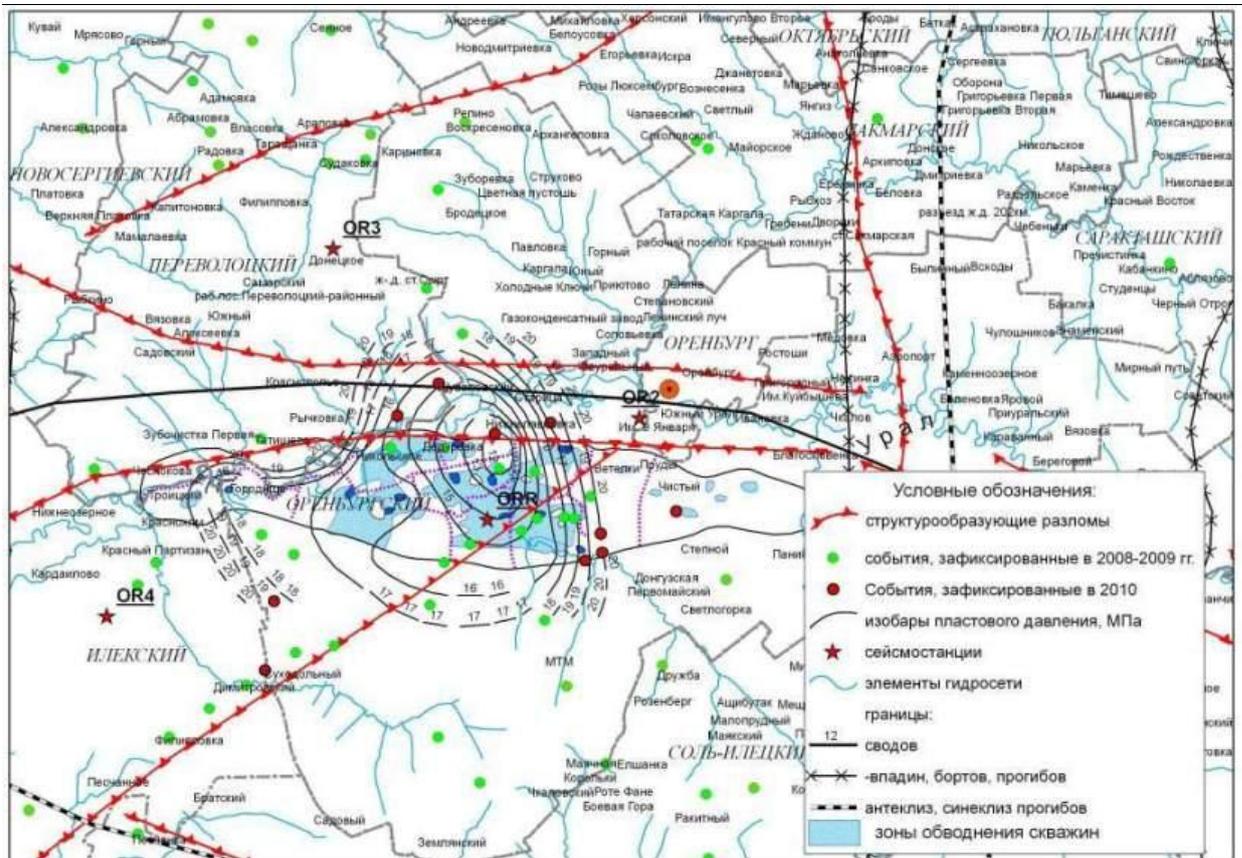


Рис. 5. Распределение давлений в пластовых водах ОНГКМ зоны обводнения газодобывающих скважин и сейсмической активности района ОНГКМ (по материалам Оренбург НИПИгаз и данным автора)

При изучении и моделировании динамики подземных вод в условиях техногенеза значимым является вопрос определения направления и количественной оценки движения подземных вод по вертикали и латерали и о наличии вертикальной гидродинамической связи между водоносными горизонтами осадочного чехла, так как они влияют на перераспределение напряжений в геологической среде.

При анализе распределения давлений в пластовых водах ОНГКМ через 35 лет его эксплуатации установлено, что на месторождении, занимающем площадь около 2500 км^2 , уменьшение давлений в пластовых водах в результате добычи газа произошло на площади более 5000 км^2 (рис. 6). В центральной части месторождения давление пластовых вод уменьшилось более чем на 10 МПа,

в среднем – на 6 МПа. Это привело к изменению гидродинамического и энергетического балансов и накоплению потенциальной энергии.

В центральной части месторождения при уменьшении давления газа более чем на 10 МПа некомпенсированное напряжение в выше и ниже расположенных горных породах составляет соответственно порядка 1000 т на квадратный метр. Примерно на эту же величину увеличиваются градиенты давления между пластовыми водами месторождения и прилегающими к ним водоносными комплексами, обуславливая местные ускорения движения подземных вод по латерали и вертикали.

Проведенный анализ данной локальной гидрогеосистемы показывает, что природные и техногенные сейсмические события имеют ряд причинно-следственных различий во взаимодействии с гидрогеосистемой земной коры. Техногенные сейсмические события происходят в результате вмешательств человека в геологическую среду, нарушающих ее геометрию, напряженно-динамическое равновесие в ее структурах и, как правило, в водной системе. Особенно большие техногенные изменения происходят в водной системе в разрабатываемых месторождениях углеводородов. Изменения пластового давления при добыче углеводородов воздействуют на прилегающие водоносные комплексы в больших объемах земной коры, относительно быстро нарушая исторически сложившееся естественное совокупное гидрогеодинамическое состояние в них давлений и напряжений за счет снижения архимедовых сил в депрессионной воронке. По достижении и превышении критического уровня вертикальных и, в особенности, горизонтальных компонент напряжений за счет суммарного эффекта взаимодействия техногенных и всех прочих геодинамических процессов в рассматриваемом аномальном тектоническом узле формируется зона высокой потенциальной энергии с последующей реализацией ее в сейсмическую энергию в виде серий сейсмических событий.

Различна роль водного фактора в природных и техногенных сейсмических событиях. В природных землетрясениях подземные воды часто выступают как их предвестники. Повышается или понижается уровень воды в колодцах и скважинах, как правило, на небольшую величину. После землетрясений также может понизиться или повыситься их уровень (Киссин, 1982). В случае природных землетрясений изменения в динамике подземных вод являются следствием геодинамических процессов в земной коре. При техногенной сейсмиче-

ской активности недр на разрабатываемых месторождениях нефти и газа изменившееся до десяти МПа и более давление пластовых вод воздействует и нарушает сложившуюся природную напряженность в геологических структурах, обуславливая в них те или иные подвижки и соответствующие им сейсмические события. Поэтому необходимы исследования динамики пластовых вод и окружающих их водоносных горизонтов для понимания и прогноза техногенной сейсмичности (Нестеренко, 2010).

При добыче нефти и газа техногенезом охватываются объемы недр до нескольких тысяч кубических километров и на площадях в тысячи квадратных километров. Основное влияние добыча нефти и газа оказывает на динамику жидкой и газообразной составляющих недр (нефть, вода и газ) и через них изменяются геодинамические и геофизические процессы в недрах, обуславливая землетрясения и затем проседание и воздымание земной поверхности.

В связи с особенностями влияния добычи углеводородов на недра необходима соответствующая методика их мониторинга.

В целях обеспечения безопасной эксплуатации месторождений углеводородов целесообразно принять непрерывный контроль сейсмической активности основными методами геофизического и сейсмического мониторинга, сохранив методы геодезического контроля деформации земной поверхности лишь на участках аномально высокой сейсмической активности, которые выявляются по результатам сейсмического мониторинга. Комплексная система геодезического контроля деформации земной поверхности с сейсмическим мониторингом позволяет существенным образом повысить эколого-промышленную безопасность объектов нефтегазового комплекса с уменьшением на неё затрат.

Прогноз техногенной сейсмичности предполагает разработку геодинамической модели естественных тектонических процессов, оценку техногенного воздействия на среду, а также организацию исследований наведенных деформаций земной поверхности. Задача сейсмологического прогнозирования во всем мире не имеет однозначного решения. Это связано с объективной сложностью изучения деформационных процессов, происходящих в земной коре, и недостаточным развитием сетей геодинамического мониторинга. Основой будущих действующих моделей деформационных процессов для крупных регионов являются работы по геодинамическому районированию на основе комплексного мониторинга недр.

В условиях интенсивной добычи нефти и газа на значительной части Южного Предуралья на фоне природных физико-геологических процессов и природной сейсмичности сформировалась техногенно-природная сейсмическая активность.

Природная сейсмичность.

К природной сейсмичности относятся сейсмические события, обусловленные геофизическими и геодинамическими процессами, происходящими в земной коре и глубже расположенных структурах Земли без вмешательства в них человека. Их источник, как правило, расположен в нижней части земной коры в кристаллическом фундаменте и глубже. Природные землетрясения обычно охватывают большие объемы земной коры.

Под воздействием внешних (космических) сил и внутренних геофизических процессов Земли в ее коре нет территорий, которые не испытывали бы природных (естественных) землетрясений той или иной силы и периодичности. Магнитуда сейсмических событий и их частота на той или иной территории зависят от геологического строения континентов и их платформ, скорости геофизических процессов в них, взаимодействия между платформами, расположения на исследуемой территории тектонических плит, платформ и их блоков.

Расположенные на границах тектонических структур территории обычно имеют более интенсивные геофизические процессы и соответственно повышенную сейсмическую активность. По данным сейсмического районирования ОСР-97, территория Южного Предуралья имеет 6-7-балльную вероятную сейсмичность.

Предложенная нами ранее карта простираний зон планетарно-тектонической трещиноватости использована при анализе распределения эпицентров сейсмических событий в районе Южного Предуралья.

В табл. 1 даны сведения о количестве зарегистрированных событий, эпицентры которых попадают в зоны вдоль разломов на разном расстоянии от них. По данным трехлетних наблюдений за сейсмичностью, выявлено, что в пределах 5 км от разломов плотность событий составляет 0,00263 ед./км²год. В полосе на расстоянии от 5 до 10 км от разлома она уменьшается на 23 % - до 0,00203. За пределами 10 км от разлома количество событий уменьшается в 2 – 3 раза в сравнении с их количеством в зонах ближе 5 км и близко к средней плотности сейсмических событий во всей контролируемой сети сейсмических

станций территории нефтегазоносного Южного Предуралья, равной $0,0008$ ед./км²год. В зоне разломов, составляющей 1 % контролируемой сейсмическим мониторингом территории Южного Предуралья, происходит около 30 % всех событий.

За пределами разрабатываемых месторождений УВ на удалении от них более чем 15 км выделившаяся энергия сейсмических событий менее 10^4 Дж/км²·год и заметного влияния на суммарную выделившуюся энергию в регионе не оказывает (рис. 6, табл. 1).

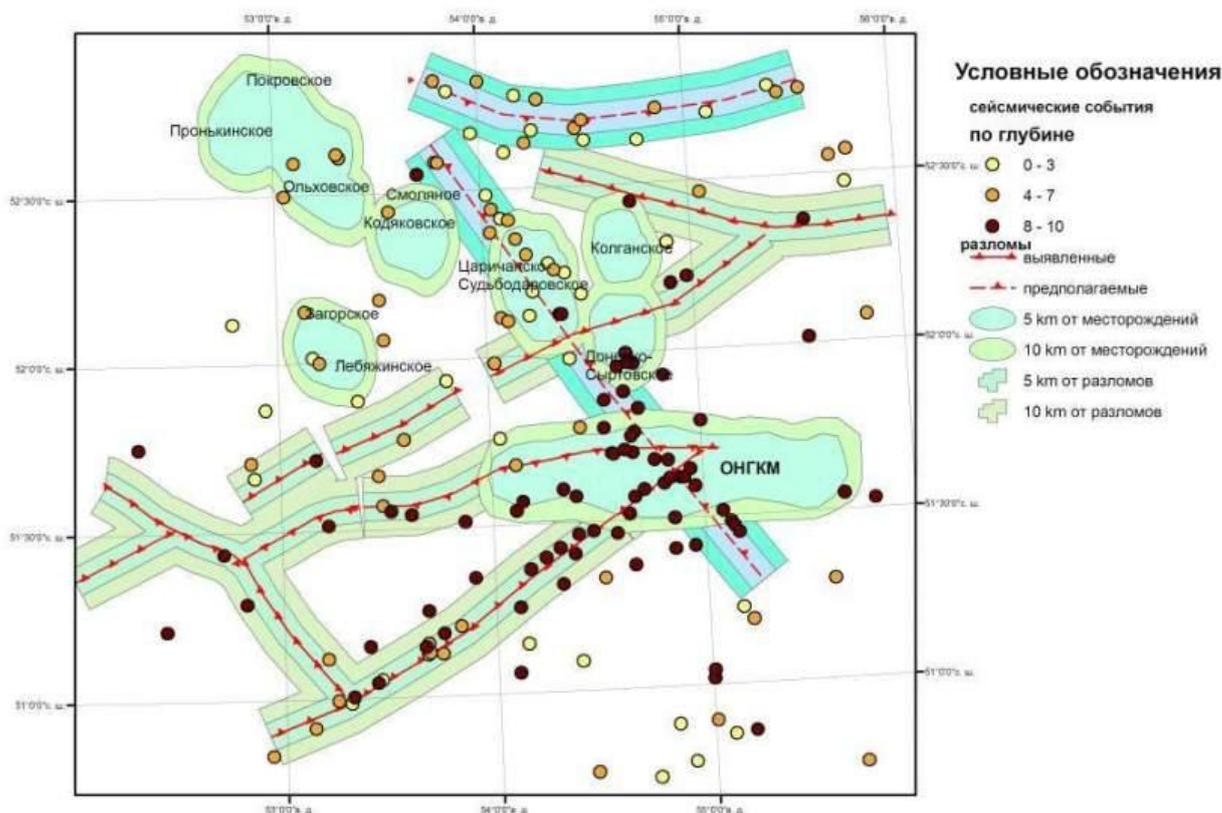


Рис. 6. Сейсмические события в 2008-2011 гг. и зоны разломов и месторождений в Южном Предуралье.

В расчете на тысячу квадратных километров за год в зоне планетарно-тектонической трещиноватости происходит около 9 событий с выделением сейсмической энергии на некоторых участках до 10^9 Дж/км²·год, а в среднем в зоне разломов выделяется $7,03 \cdot 10^6$ Дж/км²·год. На всей контролируемой сейсмической сетью территории в расчете на тысячу квадратных километров за год происходит 2-3 события с выделением сейсмической энергии до $1,14 \cdot 10^6$ Дж/км²·год. Это в 7 раз меньше среднего ее выделения в зоне разломов и более чем в 1000 раз меньше, чем среднее выделение энергии при сейсмических со-

бытиях внутри блоков на расстоянии более 15 км от разломов.

Следовательно, в зонах разломных структур формируется повышенная природная и техногенная сейсмическая активность (рис. 6, табл. 1). Это позволяет уточнять геологическое строение, в частности положение разломных структур и узлов напряженно-деформированного состояния геосреды. Включение в разломные зоны двух предполагаемых разломов приводит к увеличению на 23% плотности событий и энергии в зоне разломов.

Таблица 1. Анализ сейсмической активности в районе месторождений углеводородов в зависимости от расстояния до разломов за 2008-2010 гг.

Расстояние до разлома, км	Площадь зоны, км ²	Количество событий в среднем за год	% от общего числа событий	Плотность событий 10 ⁻³ ед./км ² в год	Сумм. выделившаяся энергия, Дж/год	Плотн. выделившейся энергии, Дж/км ² ·год
0 – 5	3532	16	27	4,4	3,69·10 ¹⁰	1,04·10 ⁷
5 – 10	3444	10,7	17	2,9	2,40·10 ¹⁰	0,69·10 ⁷
10 - 15	3494	5	7	1,2	0,66·10 ¹⁰	0,20·10 ⁷
15 – 20	4010	3,8	7	0,9	<10 ⁹	<10 ⁶
Южное Предуралье	661706	57,7	100	0,8	7,56·10 ¹⁰	0,11·10 ⁶

В техногенно измененной геологической среде ОНГКМ по контуру газоносности по северному крылу Оренбургского вала проходит разломная зона широтного простирания, совпадающая в первом приближении с простиранием русла реки Урал.

С учетом выявленной взаимосвязи простирания разломных зон и эпицентров сейсмических событий и расположения их большинства в зонах планетарно-тектонической трещиноватости, вблизи областей пересечения разломных зон и линеаментов планетарно-тектонической трещиноватости и кольцевых зон с достаточной долей уверенности можно утверждать, что эпицентры сейсмических событий тяготеют к напряженно-деформационным узлам массивов горных пород, испытывающих воздействие продолжительных природных и относительно кратковременных техногенных факторов. Послойное совмещение схем тектонических элементов территории исследований, рельефа, речной сети,

сейсмических событий и простираний зон планетарно-тектонической трещиноватости в геоинформационной системе (рис. 6, 7) позволяет сделать следующие предварительные выводы:

1. Сгущение сейсмических событий в первом приближении согласуется с техногенно нарушенными блоками массивов горных пород (месторождений нефти и газа);
2. Эпицентры сейсмических событий тяготеют к зонам разломных структур;
3. Исследование природной и техногенной сейсмичности позволяет уточнять геологическое строение верхней части земной коры, в частности положение разломных структур.

Техногенная и природно-техногенная сейсмичность

В основе техногенной сейсмичности лежат изменения в геофизических и геодинамических процессах, как правило, в верхней части земной коры, обусловленные вмешательством в них того или иного вида деятельности человека. Гипоцентры техногенных землетрясений обычно находятся не глубже 10-15 км. Объемы земной коры, охватываемые ими на современном уровне антропогенного на нее воздействия (за исключением ядерных взрывов) также меньше, чем при природных землетрясениях.

Под природно-техногенной сейсмичностью логично понимать сочетание техногенной и природной сейсмичности. Когда техногенно обусловленное сейсмическое событие является спусковым механизмом освобождения накопившейся в геологических структурах в результате естественных геофизических и геодинамических процессов энергии. Природно-техногенные землетрясения могут охватывать большие объемы земной коры и иметь большую мощность.

В настоящее время воздействие человека на сейсмичность земной коры многофакторно. На разрабатываемых месторождениях нефти и газа сейсмическими станциями фиксируется в среднем 2-3 сейсмических событий в месяц с магнитудой M_l 1 - 2 и более, что на порядок больше, чем за пределами месторождений. Большинство зафиксированных в 2007-2010 гг. сейсмических событий имеют очаги на глубинах до 10 км (рис. 7). Выявление распределения землетрясений по глубинам может служить основанием для разделения сейсмических событий на природные (эндогенного происхождения) и техногенные. На

основе данных ГС РАН [14] по мониторингу землетрясений в Евразийском материке за 2001-2003 гг. нами установлено, что в среднем в год из 98 зарегистрированных природных событий 92% произошли на глубинах 15-470 км.

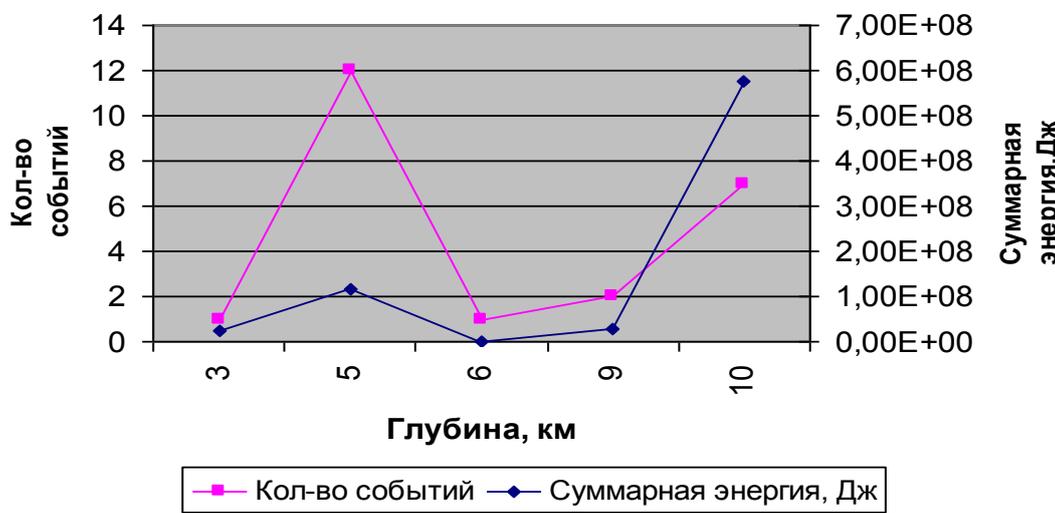


Рис. 7. Распределение землетрясений по глубинам на территории Оренбургской области в 2007-2011 гг.

В районах месторождений углеводородов Южного Предуралья в 2007-2010 гг. нами зарегистрировано в среднем 43 события в год на глубинах до 15 км.

Анализируя рис. 7, события до глубины 10 км можно, со значительной долей уверенности, отнести к техногенным и техногенно-природным. Сейсмические события глубже 20 км следует относить к природным. Анализ распределения сейсмической активности недр показывает, что основная часть сейсмических событий располагается в районах интенсивно разрабатываемых месторождений углеводородов (табл. 2). В табл. 2 даны сведения о количестве зарегистрированных событий, эпицентры которых попадают в контур и в полосовые зоны вокруг месторождений на разном расстоянии от них. Выявлено, что в контурах месторождений нефти и газа плотность событий составляет в среднем 0,0027 ед./км² в год.

Территории, удаленные от зон техногенных нарушений (центральная и восточная части Предуральяского краевого прогиба, юго-восток Прикаспийской синеклизы и др.) имеют значительно меньшую частоту сейсмических событий и вероятно они вызваны естественными тектоническими процессами. События, произошедшие в зонах техногенных нарушений геологической среды (добыча

нефти и газа и др.), происходят более часто и имеют более сложную природу, и их, по-видимому, следует относить к техногенным или природно-техногенным.

Таблица 2. Плотность зарегистрированных событий и выделившейся сейсмической энергии в районе месторождений УВ

Расстояние до месторождения, км	Площадь, км ²	Событий в год	% от общего числа событий	Плотность событий, ед./км ² год	Сумм. выделившаяся энергия, Дж/год	Плотн. выделившейся энергии, Дж/ км ² ·год
В контуре месторождений	3582	9,7	17	0,0027	1,01·10 ¹⁰	2,81·10 ⁶
0-5	3129	4,7	8	0,0015	0,93·10 ¹⁰	2,96·10 ⁶
5-10	4360	6,7	12	0,0015	0,56·10 ¹⁰	1,29·10 ⁶
Южное Предуралье	661706	57,7	100	0,0008	7,56·10 ¹⁰	0,11·10 ⁶

В полосовой зоне, ограниченной расстояниями до 10 км от месторождения, она уменьшается на 44 % до 0,0015. За пределами 10 км от месторождений количество событий уменьшается в 3-4 раза в сравнении с их количеством в контуре месторождений с плотностью 0,0008 ед./км² в год. Следовательно, в контуре месторождений и 10 км вокруг них, занимающих 1,6 % общей контролируемой сейсмическим мониторингом территории Южного Предуралья, происходит более 35 % всех зарегистрированных на ней событий (рис. 7).

По результатам сейсмического мониторинга за 2008-2010 гг. в контуре месторождений в среднем происходит около 17 % событий со средним выделением сейсмической энергии 2,81·10⁶ Дж/км²год, а на ряде участков - до 10¹⁰ Дж/км²·год. В пределах 5-километровой зоны вокруг месторождений сейсмическая активность мало отличается от сейсмической активности в контуре разрабатываемых месторождений нефти и газа. В этой зоне выявлено распространение гидродинамических воронок, сформировавшихся в результате эксплуатации месторождений (Нестеренко, 2010). В зоне 5-10 километров вокруг месторождений, где влияние гидродинамических воронок на геодинамику незначительно, сейсмическая активность уменьшается в 2-3 раза. На всей контролируемой сейсмической сетью территории в расчете на тысячу км² за год происходит менее одного события с выделением сейсмической энергии до 1,14·10⁶ Дж/км² в год.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пантелеев А.С. Геологическое строение и нефтегазоносность Оренбургской области, Оренбург: ОГУ, 1997. 225 с.
2. Соколов А.Г. Выделение и трассирование тектонических нарушений по данным сейсморазведки и прогнозирование приразломных ловушек в платформенном Оренбуржье. Оренбург: ОГУ, 2010. 107 с.
3. Валеев Р.Н. Разломы и горизонтальные движения платформенных областей СССР. М Наука, 1977: 48-67.
4. Гаев А.Я., Хоментовский А.С. О глубинной гидродинамике (на примере юго-востока Русской платформы). Докл. АН СССР, 1982. 263 (4): 967-970.
5. Гаев А.Я., Бутолин А.П., Ключин А.Н., Сивохиц Т.О. Закрытая система промышленного водоотведения газоконденсатного месторождения. Информ. листок Оренбург: ЦНТИиП., 1983, № 35-85. 2 с.
6. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Шахова Е.В. Исследования активности платформенных территорий с использованием микросейсм. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 130 с.
7. Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Разломно-блоковая тектоника и ее роль в эволюции литосферы. Литосфера и гидросфера Европейского Севера России. Геоэкологические проблемы. Екатеринбург: УрО РАН, 2001: 68-112.
8. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 года. М.: Наука, 1977. 536 с.
9. Никонов А.А. Каталог тектонических землетрясений Центральной части Восточно-Европейской платформы. Геодинамика и геоэкология, 1999: 271-273.
10. Дюнин В.И. Гидрогеодинамика глубоких горизонтов нефтегазоносных бассейнов. М.: Научный мир, 2000. 472 с.
11. Нестеренко Ю.М., Глянцев А.В. Водоносные комплексы Бузулукской впадины и их взаимодействие. Нефтепромысловое дело, 2007. 12: 30-33.
12. Киссин И.Г. Землетрясения и подземные воды. М., Наука, 1982. 176 с.
13. Нестеренко Ю.М., Нестеренко М.Ю., Днистрянский В.И., Глянцев А.В. Влияние разработки месторождений углеводородов на геодинамику и водные системы Южного Предуралья. Литосфера, 2010. 4: 28-41.
14. Старовойт О.Е. Северная Евразия. Землетрясения Северной Евразии. Обнинск, 2009: 11-44.

Поступила 06.01.2012

(Контактная информация: Нестеренко Юрий Михайлович - заведующий отделом геоэкологии ОНЦ УрО РАН, д.г.н. E-mail: geocol-onc@mail.ru; адрес: Россия, 460014, г. Оренбург, ул. Набережная, 29)