

# ЭНТРОПИЙНАЯ СЕЙСМОЛОГИЯ

# Нефть и сланец северо-восточного Китая

В РАБОТЕ ОПИСЫВАЕТСЯ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЭНТРОПИЙНОЙ СЕЙСМОЛОГИИ ДЛЯ РЕТРОСПЕКТИВНОГО АНАЛИЗА ПОДГОТОВКИ РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ВЫЯВЛЕНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ. ЭТОТ МЕТОД ПОЗВОЛЯЕТ ВЫЯВЛЯТЬ И КОНТРОЛИРОВАТЬ ОБРАЗОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ РАЗРЫВОВ В ИЕРАРХИИ БОЛЬШИХ СЕЙСМОАКТИВНЫХ ОБЪЕМАХ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ, ОТВЕТСТВЕННЫХ КАК ЗА СИЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, ТАК И ЗА УМЕРЕННУЮ И СЛАБУЮ СЕЙСМИЧНОСТЬ. ИССЛЕДУЕТСЯ ВЛИЯНИЕ НА ПРОТЕКАНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕХНОГЕННЫХ ФАКТОРОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГАЗОНЕФТЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И ДОБЫЧИ СЛАНЦЕВОГО ГАЗА НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ КИТАЯ. РАССМОТРЕНО ПРОСТРАНСТВЕННО ВРЕМЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ДИНАМИКУ ПОДГОТОВКИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В МЕСТАХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ РАЗРАБОТОК НА СВ КИТАЯ

**IN PAPER THE APPLICATION OF A METHOD OF ENTROPY SEISMOLOGY FOR THE RETROSPECTIVE ANALYSIS OF PREPARATION OF POWERFUL EARTHQUAKES AND IDENTIFICATION OF THE MAN-MADE COMPONENT IS DESCRIBED. THIS METHOD ALLOWS TO DETECT AND MONITOR THE FORMATION OF TECHNOGENIC BREAKS IN THE HIERARCHY OF LARGE SEISMIC ACTIVE VOLUMES OF THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT RESPONSIBLE BOTH FOR STRONG AND MODERATE EARTHQUAKES AND WEAK SEISMIC ACTIVITY. INVESTIGATES THE IMPACT ON THE FLOW OF NATURAL SEISMIC PROCESSES OF TECHNOGENIC FACTORS IN THE DEVELOPMENT OF OIL AND GAS DEPOSITS AND SHALE GAS IN NORTH-EAST CHINA. CONSIDERED SPATIALLY TEMPORARY IMPACT ON THE DYNAMICS OF PREPARATION OF STRONG EARTHQUAKES AND INDUCED SEISMICITY IN A HYDROCARBON FIELD DEVELOPMENT IN NE CHINA**

**Ключевые слова:** Индуцированная сейсмичность, энтропия, анализ нестабильности, сильные землетрясения, сланцевый газ.

**Самвел Цолакович  
Акопян,**  
ведущий научный сотрудник  
Института физики Земли  
им. О.Ю. Шмидта РАН, доктор  
физико-математических наук

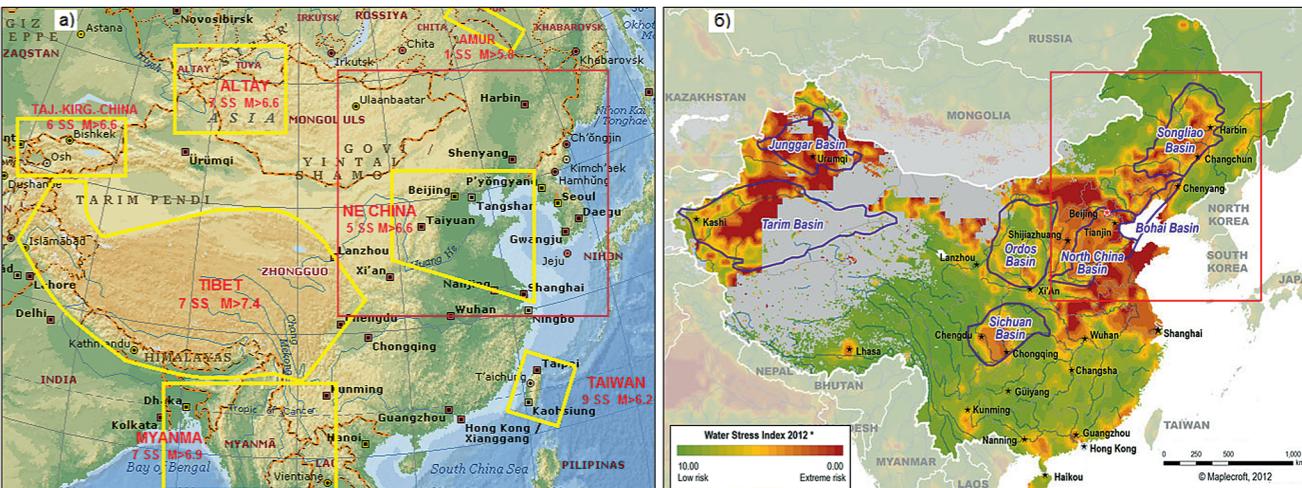
Теория энтропийной сейсмологии описана в работах [3, 4, 9]. Она позволяет контролировать развитие неустойчивости и образование разрывов в больших объемах геологической среды на основе сейсмостатистики.

Подготовка сильных землетрясений определенного энергетического уровня (выше некоторой пороговой магнитуды) происходит в объеме литосферы (имеющей конфигурацию на поверхности и глубину), названной *сейсмической системой* (СС). Было показано, что иерархическое разбиение СС и переход от больших систем к малым путем снижения пороговых магнитуд землетрясений, позволяет применять метод сейсмической энтропии для решения технологических задач в нефтегазовой отрасли. Пороговая магнитуда разделяет землетрясения внутри СС на сильные и относительно слабые - землетрясения индикаторы, участвующие в подготовке сильных землетрясений. На основе метода сейсмической энтропии можно восстановить и прогнозировать динамическое поведение геологической среды назад во времени, взглянуть на

подготовку уже произошедших сильных землетрясений, изучить и выявить присутствие техногенной составляющей. На естественные процессы подготовки сильных землетрясений могут влиять масштабные техногенные изменения внутри геологического объема СС, возникающие при эксплуатации водохранилищ, нефтегазовых разработок, добычи сланцевого газа и др. [1, 2, 5, 9]. Техногенная составляющая, в зависимости от особенностей региона, может по-разному влиять на протекание сейсмических процессов. В рамках СС она может вызывать индуцированную сейсмичность относительно слабых землетрясений, усилить магнитуду сильного землетрясения, спровоцировать ее раньше времени, вызвать миграцию очага, спровоцировать новый очаг сильного землетрясения. В работах [1,2] обсуждались возможности применения метода сейсмической энтропии: для решения технологических задач контроля динамики развития гидроразрыва пласта (ГРП) на месторождениях углеводородов; для экологического контроля наведенной сейсмичности из-за разработки месторождений сланцевого газа.

УДК 550.3 550.8.05

РИС. 1. Сейсмические системы (а) и нефтегазовые бассейны (б) в Китае



## **Нефтегазовые месторождения и сейсмические системы Китая**

На основе метода сейсмической энтропии в сейсмически активных регионах Китая и прилегающих территорий были выявлены 7 СС и более 33 подсистем разного энергетического уровня. На рисунке 1а показана конфигурации этих 7 регионов на карте Китая, которую автор демонстрировал в 2013 году во время видеомоста Москва-Пекин [7]. Для каждого региона показано число выявленных СС, ответственных за подготовку сильных землетрясений выше указанного порога магнитуд. Протяженность этих систем сотни и тысячи километров, самая большая из которых СС Тибет (~2000 км). Для сравнения, на рисунке 1б показано расположение нефтегазовых бассейнов Китая [10]. Это бассейны: Тарим, Юнгаар, Кайдме, Сычуань и Ордос на западе; Сонльяо (Songliao), Бохайский залив (Bohai Bay) на востоке.

Сиреневые контуры – это осадочные бассейны с возможностью промышленной добычи сланцевого газа. Спектр цветов на карте от зелёного до красного – шкала динамики водных ресурсов (*Water Stress Index* – это соотношение общего потребления воды к возобновляемым источникам воды) в соответствующих местах. Индекс рассчитывается как отношение суммы внутреннего, промышленного и сельскохозяйственного спроса по сравнению с имеющимся местным стоком, которое поступает через ручьи, реки и мелкие подземные воды. На рисунке 1 видна

приуроченность этих бассейнов к СС. Большим красным квадратом показана область на СВ Китая, которую мы будем исследовать.

СВ Китай

На рисунке 2 приведена схема тектоники СВ Китая из работы [11], охватывающая нефтегазовые бассейны Сонльяо, Бохайский залив. Этот регион отделен от Восточно-Сибирского кратона Монгольско-Охотской шовной зоной и отмечен поясом Иньшань-Яншань на юге и поясом Дасин-Ганлинг на востоке. В бассейне Сонльяо расположено

супергигантское нефте-газовое месторождение Дацин (Daqing), крупнейшее в Китае. Оно открыто в 1959 году, залежи на глубине 1–4 км. Кроме традиционных нефтяных месторождений здесь выявлены мощные нижне-меловые пласти сланца озерного происхождения, богатые глиной, но их преимущество заключается в очень высоком давлении, естественным образом растрескивающих породу. Перспективные сланцы обнаружены в изолированных полограбенах на глубине от 300 до 2500 м. С 2013 года начата масштабная добыча

РИС. 2. Расположение бассейнов Сонльяо, Бохайский залив и тектоника Северо-Китайско-Монгольского региона (NCMT). YYF – разлом Илан-Итон; DMF – разлом Дуньхуа-Мишан; HSZ – зона Shear Shear; B – бассейн; F – разлом. Красные кружки – сильные землетрясения с  $M \geq 7.0$ , зеленые кружочки – индуцированная слабая сейсмичность с  $M \geq 5.0$

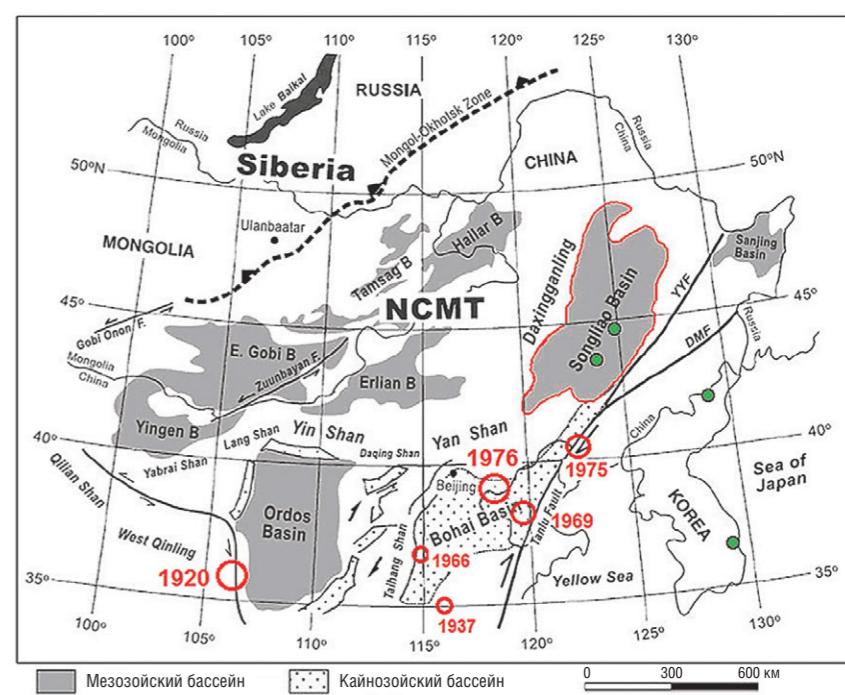
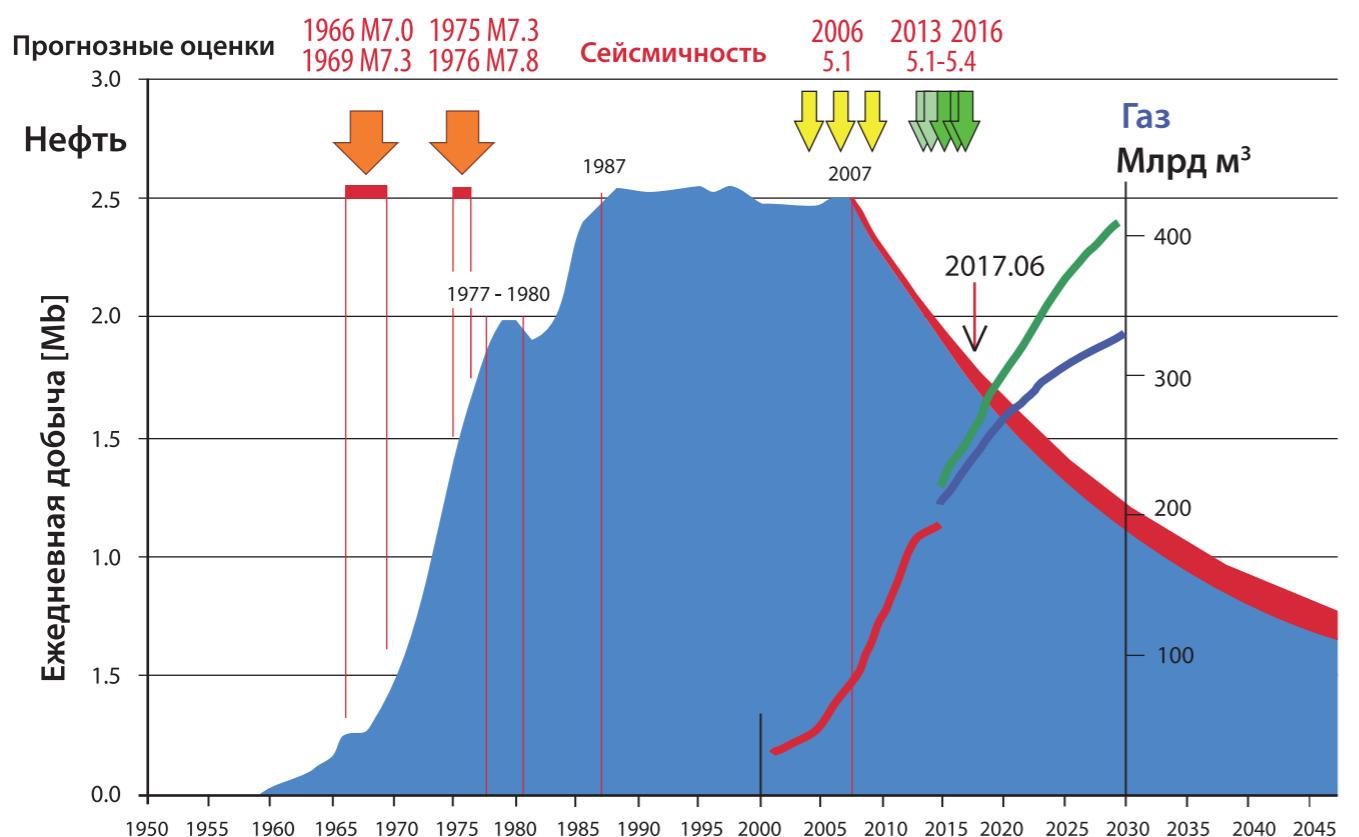


РИС. 3. Диаграмма и прогноз эксплуатации месторождения Дацин с 1960 г. Справа наложено: Фактическое (с 2000 г.) и прогноз потребления газа в КНР в 2015-2030 гг. Стрелками наверху обозначены сильные землетрясения на СВ Китая и индуцированная слабая сейсмичность с  $M \geq 5.0$  в бассейне Дацин и в Корее. Времена этих землетрясений отмечены на рисунке 3 стрелками наверху классификации [4]. Исследование



сланцевой нефти и газа. Запасы сланцевого газа в бассейне Бохайского залива находятся на четвертом месте после бассейнов Ордос, Сычуань, Тарим и 1.6 раза больше чем в бассейне Сонльяо.

На месторождении Дацин неуклонно растет и нарастает угроза техногенного землетрясения, которая может вызвать локальные техногенные катастрофы (нарушения технологии добычи, нежелательные прости производства, обрушения зданий конструкций, человеческие жертвы, экологические загрязнения и т.д.). На рисунке 3 приведена диаграмма эксплуатации для месторождения Дацин с 1960 г. и ее прогноз до 2045 года [10]. На нее наложен график фактического потребления (с 2000 г.) и прогноз потребления газа в КНР в 2015-2030 гг. [6]. На рисунке 2 показаны эпицентры сильных землетрясений с  $M \geq 7.0$  и индуцированная слабая сейсмичность с  $M \geq 5.0$  в бассейне Дацин и в Корее. Времена этих землетрясений отмечены на рисунке 3 стрелками наверху классификации [4]. Исследование

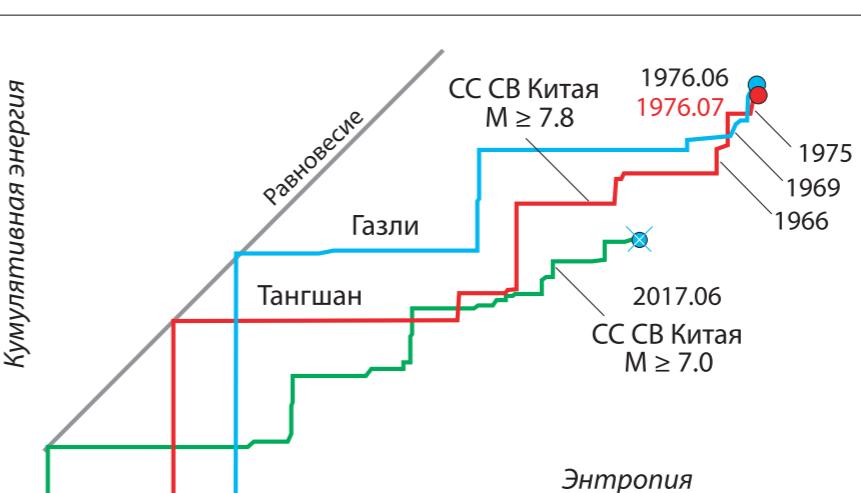
#### Сейсмические системы на СВ Китая

На СВ Китая на основе каталога землетрясений (с 1910 г.) были выявлены 5 СС, с пороговыми магнитудами 6.6, 7.0, 7.3 и 7.8, контролирующие сильные землетрясения. Сейсмоактивная область на северо-востоке Китая включает столицу Пекин и индустриальные плотно заселенные провинции. Эта область известна сейсмологам тем, что здесь 4 февраля 1975 году произошло разрушительное Хайченское землетрясение  $M = 7.3$ , которое было успешно предсказано китайскими сейсмологами (погибло 2041 чел., но были спасены сотни тысяч жизней). А 28 июля 1976 году здесь же произошло катастрофическое Тангшанское землетрясение  $M = 7.8$ , которое по материальным потерям и человеческим жертвам относится к одним из самых опустошительных (по разным оценкам погибло от 240 000 до 600 000 человек). Выявленная здесь СС СВ Китай относится к плохо-определенным по нашей классификации [4]. Исследование

иерархии СС с возрастающей пороговой магнитудой показало, что Хайченское землетрясение являлось триггером и предвестником катастрофического Тангшанского землетрясения, а историческое землетрясение 1966 ( $M = 7.0$ ) - триггером землетрясения 1969 ( $M = 7.3$ ). На трековой диаграмме (рисунок 4) видно, что все три землетрясения 1966, 1969 и 1975 гг. в течение 10 лет существенно приподняли трек подготовки катастрофического землетрясения, который при большом значении энтропии имел дефицит кумулятивной энергии, чтобы попасть в область неустойчивости. На рисунке 4 трек подготовки Тангшанского землетрясения сопоставлен с треком подготовки Газлийского землетрясения (Узбекистан, 1976.05.17,  $M = 7.3$ ). Примечательно, что точки неустойчивости этих землетрясений почти совпадают, а за месяц с лишним до землетрясения с  $M = 7.3$  в Газли также произошло триггерное землетрясение (1976.04.08,  $M = 7.0$ ). Наши исследования показывают, что Газлийские землетрясения 1976 г. и каскад из трех землетрясений

на СВ Китая были подготовлены соответственно тектоникой в СС Средняя Азия и СС СВ Китая. Закачка воды при добыче газа в Газли могла способствовать образованию магистрального разрыва вблизи Газли. Т.е. в результате техногенного фактора очаг землетрясения, подготовленного тектоникой, из ожидаемой зоны сейсмоактивных разломов в рамках СС Средняя Азия переместился на сотни километров на запад, туда, где до этого не было сильных землетрясений. Как видно на рисунках 2 и 3, эпицентры трех землетрясений, расположенных внутри бассейна Бохайский залив мигрировали на СВ, в сторону месторождения Дацин и по времени совпадали с стремительным ростом добычи нефти на месторождении. Траектория подготовки катастрофического Тангшанского землетрясения и пространственно временная картина миграции очагов сильных землетрясений 1966, 1969 и 1975, подготовивших катастрофу, указывают на взаимосвязь катастроф 1975 и 1976 гг. с разработками месторождения Дацин. Обширные и интенсивные разработки на месторождении Дацин в целом ослабили сплошность бассейна Сонльяо, что сказалось на несущей способности и устойчивости связанного с ней бассейна Бохайский залив. Дальнейшее развитие индустрии добычи сланцевого газа и появления связанной с ней наведенной сейсмичности вне рамок СС с 2007 года, подтверждает существование такой взаимосвязи.

РИС. 4. Трековая диаграмма. Красная линия - трек Тангшанского землетрясения (1976), голубая - Газлийского землетрясения (1976), зеленая - трек подготовки землетрясения с  $M = 7.0$  на СВ Китая на июнь 2017 г.

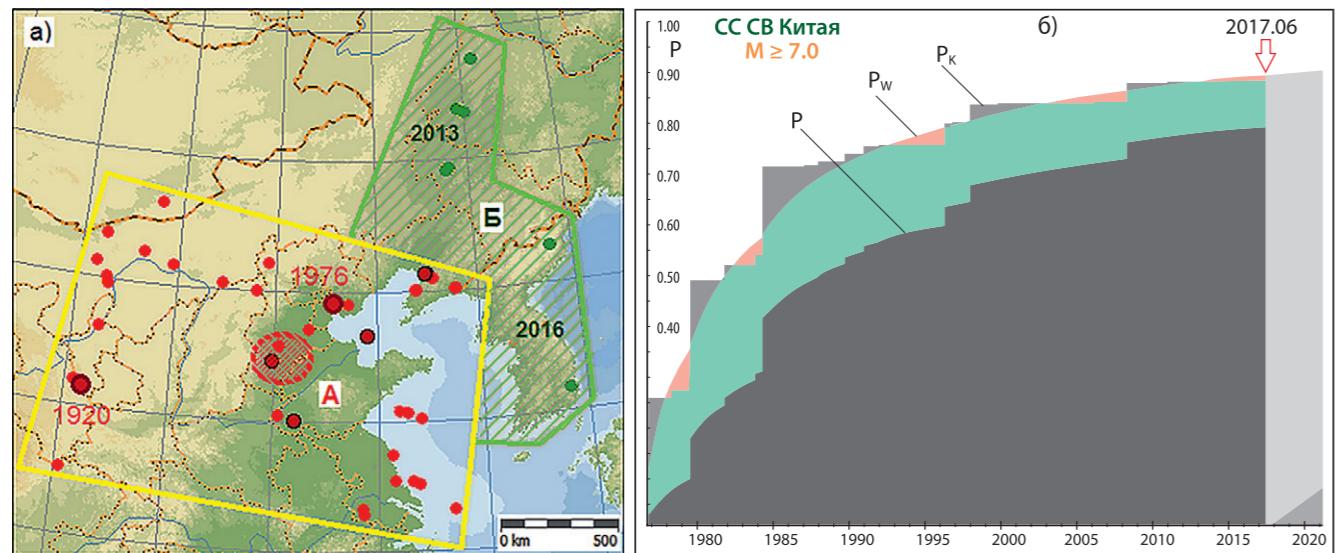


#### Разработки сланцевого газа и прогноз развития сейсмичности на СВ Китая

В 2013 г. Государственное управление по делам энергетики КНР опубликовало политику развития добычи сланцевого газа, в которой предусмотрен ряд мер на поддержку разработки месторождений сланцевого газа, создания передовых районов добычи и общие правила регулирования отрасли [6, 8, 10]. Из экономических соображений сланцевый газ добывается в непосредственной близости от мест использования, и это приводит к образованию довольно густой сети скважин в обширных густонаселенных районах [2]. Отсюда возникают экологические проблемы сланцевых разработок, связанные с добычи нетрадиционных углеводородов с применением горизонтального бурения и ГРП. Потенциальные экологические риски, такие как загрязнение подземного водоносного слоя, активизация сейсмической активности выходят на первый план. Резкий рост добычи сланцевого газа с 2013 года и повышение водопользования для целей ГРП, жизненно необходимого для добычи сланцевого газа и сланцевой нефти в районе бассейна Бохайский залив, могли вызвать сейсмичность на СВ Китая и в Корее. Как видно на рисунке 3 на фоне общего спада добычи нефти с 2013 года намечается активизация добычи сланцевого газа. С 2007 начинается

активизация слабой сейсмичности с  $M \geq 4.0$  вне рамок СС СВ Китая в зоне Б на рисунке 5а, вследствие чего в 2013 и 2016 гг. наблюдается активизация чувствительных землетрясений индикаторов с  $M = 5.1-5.4$  на месторождении Дацин и на Корейском полуострове. На языке метода сейсмической энтропии это означает, что рамку СС необходимо расширить. Из этого следует, что в будущем в зоне Б могут быть подготовлены землетрясения с магнитудами  $M = 5.4-5.8$ . Для справки отметим, что до 2016 года самое мощное землетрясение на Корейском полуострове природного происхождения было зафиксировано 8 января 1980 г. на территории Северной Кореи. Тогда сила толчков составила 5.3 балла. Согласно историческим летописям, сильные землетрясения в Южной Корее были в 779 г. в районе Кенчжу и в 1643 г. в районе Ульсан. Эпицентры большинства землетрясений в Южной Корее находятся в непосредственной близости от рекордного в мире скопления атомных реакторов. В радиусе 70 км от Кенчжу работают более десяти атомных реакторов. Обеспокоенное возрастающей сейсмической опасности, правительство Южной Кореи намерено к 2018 г. разработать новые меры и стандарты безопасности для атомных электростанций, где будут учтены рекомендации специалистов-сейсмологов. На рисунке 4 показана траектория подготовки разрушительного землетрясения с  $M = 7.0$ . Динамика роста вероятности такого землетрясения в СС СВ Китая с пороговой магнитудой  $M = 7.0$  приведена на рисунке 5б. Она рассчитана по методу [9] после землетрясения 1976 г. и спустя 41 год, к июню 2017 г. достигла высокого значения  $P = 79.65\%$  (по энергии РК = 88.67%, по энтропии РW = 89.83%). Опасность в ближайшие три года будет локализована на юге провинции Хебэй (Hebai), в зоне А на рисунке 5а. Спустя 41 год на основе метода сейсмической энтропии удалось доказать взаимосвязь разрушительных землетрясений на СВ Китая с 1966 по 1976 гг. и выяснить влияние техногенных факторов на их подготовку.

РИС. 5. а) Границы СС СВ Китая до 2013 и после. Зеленым указаны расширение СС из-за наведенной сейсмичности; А – опасная область ожидания сильного землетрясения в ближайшие три года.  
б) Динамика роста вероятности подготовки сильного землетрясения с  $M \geq 7.0$  в СС Северо-Восток Китая на июнь 2017 г.



Количественно исследовано возможное влияние техногенных эффектов на протекание сейсмических процессов из-за нефтегазовых разработок на месторождении Дацин и добычи сланцевого газа в Бохайском заливе. Показано, что сильные землетрясения подготавливаются тектоникой, а влияние вмешательства человека в жизнь земных недр на СВ Китая при разработке нефти и сланцевого газа может внести некоторые коррективы в сейсмические процессы. Местоположение очагов сильных землетрясений могут мигрировать в рамках СС

и привести к триггерным сильным землетрясениям. География индуцированной сейсмичности с магнитудами  $M \geq 5.0$  на СВ Китая, участвующих в подготовке разрушительных землетрясений и представляющих опасность для жизнедеятельности человека, может существенно расширяться и охватить Корейский полуостров. Эти добавочные техногенные эффекты можно выявлять, прогнозировать и контролировать методами энтропийной сейсмологии, снижая экологический риск и корректируя планирование нефтегазовых разработок. ●

#### Литература

- Акопян С.Ц. Применение метода сейсмической энтропии для решения технологических задач в нефтегазовой отрасли // ROGTEC. 2014, 38. С. 56-63.
- Акопян С.Ц. Энтропийная сейсмология и ее применение при разработке сланцевого газа // Экспозиция Нефть Газ. 2015, 6, 45. С. 40-43.
- Акопян С.Ц. Сейсмические системы, закон производства энтропии и ансамбли сильных землетрясений // Изв. РАН, Физика Земли. 2016, 6. С. 1-22.
- Акопян С.Ц., Бондар В.Г., Рогожин Е.А. Технология мониторинга и прогнозирования сильных землетрясений на территории России с использованием метода сейсмической энтропии // Изв. РАН, Физика Земли. 2017, 1. С. 1-20.
- Акопян С.Ц. Энтропия, мониторинг сейсмичности на Армянском нагорье и динамика заполнения Ахурянского водохранилища // Вопросы инженерной сейсмологии. 2017. Т. 44. №2. С. 5-14.
- Богоявленский В.И., Баринов П.С., Богоявленский И.В., Якубсон К.И. Газовая революция в Китае // Бурение и Нефть. 2016. №11. С. 3-14.
7. Видеомост Москва - Пекин: "Сейсмобезопасность: как уберечься от стихии? Опыт России и Китая" // Международный мультимедийный пресс-центр РИА Новости. 14 мая 2013. <https://ria.ru/announce/20130513/937031207.html>
8. Китай: нефтегазовая отрасль, сланцевый газ, вода, экология // LIVEJOURNAL, 22 ноября 2013. <http://iv-g.livejournal.com/968160.html>
9. Akopian S.Ts. Open dissipative seismic systems and ensembles of strong earthquakes: energy balance and entropy funnels // Geophysical Journal International. 2015, V. 201. P. 1618-1641.
10. [http://www.tsl.uu.se/uhdsg/Publications/China\\_GOF.pdf](http://www.tsl.uu.se/uhdsg/Publications/China_GOF.pdf) 17.06.2012.
11. Yongjian H., Cheng-Shan W. Scientific Drilling of the Terrestrial Cretaceous Songliao Basin // Scientific Drilling, No. 6, July 2008. P. 60-61. doi:10.2204/iodp.sd.6.11.200

KEY WORDS: Kirinskoye field, geological uncertainty, hydrodynamic modeling, production data, offshore of Sakhalin Island.

