

УДК 629.1.033.3

ОПЫТ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ И СЕЙСМОПРОГНОСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В АЗЕРБАЙДЖАНЕ¹

*Етирмишли Г. Д.², Рзаев А. Г.³, Керимова Р. А.⁴, Абдуллаева Р. Р.⁵,
Казымова С. Э.⁶*

EXPERIENCE AND PREDICTION OF SEISMIC STUDIES IN AZERBAIJAN

Yetirmishli G. D., Rzayev A. G., Keramova R. A., Abdullaeva R. R., Kazimova S. E.

Seismicity of territory of republic during 2005–2011 is considered. The analysis of distribution of the allocated seismic energy on years, distribution of epicenters of earthquakes on the basis of what the estimation of an intense situation and seismic activity in republic territory is given. The analysis of mechanisms of the centers of strong earthquakes for the purpose of revealing of fields of pressure and earth crust deformations in hotbed zones is given. Experience seismic prediction researches for the purpose of revealing of seismo-abnormal effects in geophysical and geochemical fields is considered, the basic characteristic signs of display of seismo-abnormal effects are given. Experience of revealing of tensely – deformed seismogene zones under the geophysical data is considered. The new high-speed model for territory of Azerbaijan according to a network of seismo-telemetering stations is considered.

Keywords: earthquakes, seismicity, geophysical fields, geochemical field, velocity model, digital seismic stations.

Введение

Республиканский центр сейсмологической службы (РЦСС) Национальной академии наук Азербайджана является головным сейсмологическим ведомством республики и создан по распоряжению директивных органов Азербайджана в 1979 г.

Научно-производственная деятельность Центра осуществляется в двух направлениях:

1) мониторинг сейсмичности территории республики, изучение кинематических и динамических параметров сейсмического поля, распределения эпицентров землетрясений и сейсмической энергии, оценка сейсмическо-

го риска, механизма очага землетрясений и уточнение элементов сеймотектоники;

2) мониторинг пространственно-временных вариаций параметров геофизических и геохимических полей с целью выявления и изучения характера проявления сейсмоаномальных эффектов в геофизических и геохимических полях и оценки напряженно-деформированного состояния сейсмогенных зон. Предметом исследований здесь являются параметр вариаций напряженности геомагнитного поля τ , приращение градиента напряженности геомагнитного поля, неприливные вариации гравитационного поля и вторых производных гравитационного потенциала, а также параметры гидрогеохимиче-

¹Работа выполнена при поддержке РФФИ (11-08-97061).

²Етирмишли Гурбан Джалал, д-р гео.-мин. наук, генеральный директор Республиканского центра сейсмологической службы Национальной академии наук Азербайджана; e-mail: science@azeurotel.com.

³Рзаев Азай Гурбат, кан. физ.-мат. наук, заместитель генерального директора Республиканского центра сейсмологической службы Национальной академии наук Азербайджана; e-mail: azay_r@yahoo.com.

⁴Керимова Рамида Агададаш, д-р гео.-мин. наук, руководитель отдела геохимии Республиканского центра сейсмологической службы Национальной академии наук Азербайджана; e-mail: keramovar@mail.ru.

⁵Абдуллаева Расима Рашид, руководитель отделом обработки и анализа сейсмического материала Республиканского центра сейсмологической службы Национальной академии наук Азербайджана; e-mail: science@azeurotel.com.

⁶Казымова Сабина Эльдар, канд. гео.-мин. наук, ведущий научный сотрудник бюро обработки землетрясений Республиканского центра сейсмологической службы Национальной академии наук Азербайджана; e-mail: sabina.k@mail.ru.

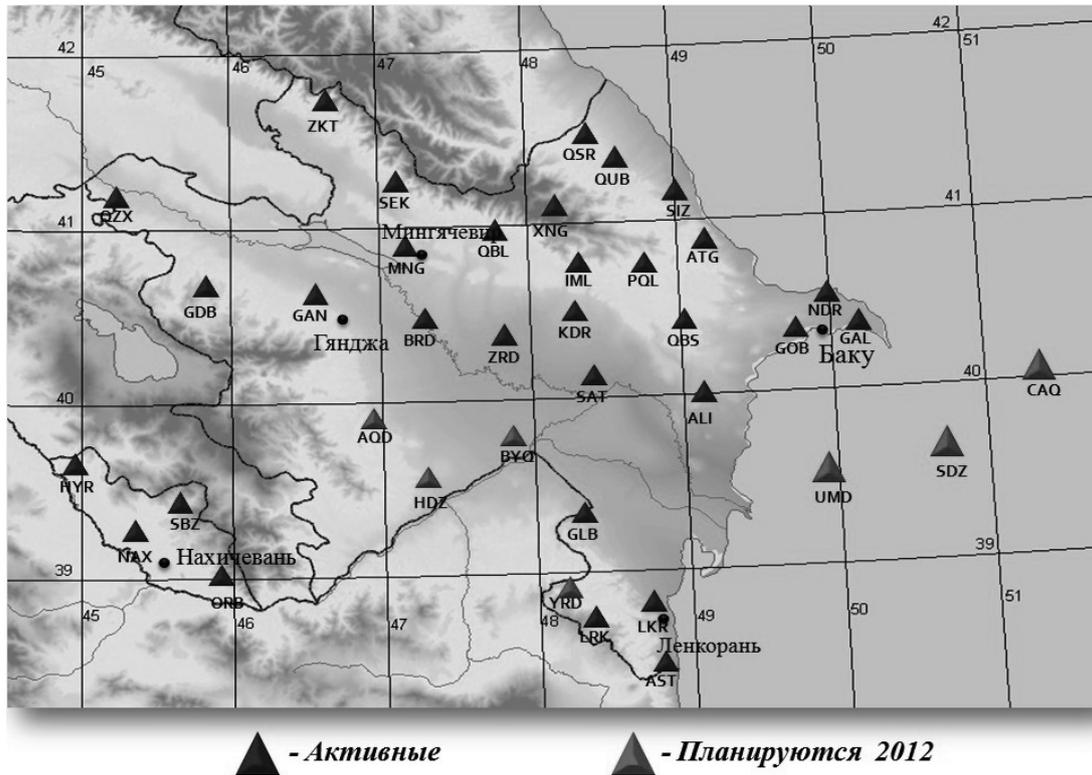


Рис. 1. Карта распределения мониторинга Азербайджанской сейсмологической службы

ского, газогеохимического и радиогеохимического полей.

Исследования проводятся на базе сети сейсмотелеметрических станций системы “Kinometrics” (США) в количестве 31 телеметрических станций, 6-ти магнитовариационных станций G-856 (протонный магнитометр) производства Geometrics (США) и 6-ти геохимических станций (рис. 1).

Планируется открытие 3-х сейсмотелеметрических станций в акватории Каспийского моря на базе данных сейсмографов производства “Kinometrics”, 4-х магнитовариационных станций системы “Geometrics” и 4-х станций сейсмогеохимического мониторинга.

Сейсмический мониторинг проводится в реальном масштабе времени с передачей информации по спутниковым каналам связи.

РЦСС является действительным членом таких международных сейсмологических ведомств как IRIS (Объединенные Исследовательские Учреждения по Сейсмологии), Orfeus (Обсерватория научных Исследований и Услуг для Сейсмологии в Европе) и CSEM (Европейско-Средиземноморский Сейсмологический Центр).

Научный потенциал Центра составляют около 300 специалистов, в том числе 9 док-

торов наук и 11 докторов философии в области геофизики. Центр поддерживает научные связи с институтами из 13-ти стран мира.

1. Сейсмичность территории республики за период 2005–2011 гг.

Сейсмичность территории республики за период 2005–2011 гг. была неравномерной как по числу землетрясений, так и по выделившейся в их очагах суммарной сейсмической энергии (рис. 2). Число землетрясений достигло аномального значения в 2010 г. за счет увеличения слабой сейсмичности. Наибольшая энергия за этот период выделилась в 2007 г. ($E = 73,9 \cdot 10^{11}$ Дж).

Это свидетельствует о том, что происходит активизация сеймотектонических событий, имеют место подвижки в отдельных тектонических структурах, реализующиеся в виде ощутимых 5–6 балльных землетрясений.

Из карты эпицентров землетрясений видно, что землетрясения распределены неравномерно, сейсмичность носит мозаичный характер. Наибольшее сгущение эпицентров наблюдается в Шамаха-Исмаиллинской сейсмоактивной зоне, Тальше, в районе Загаталы-Лагодехи и северо-западной части

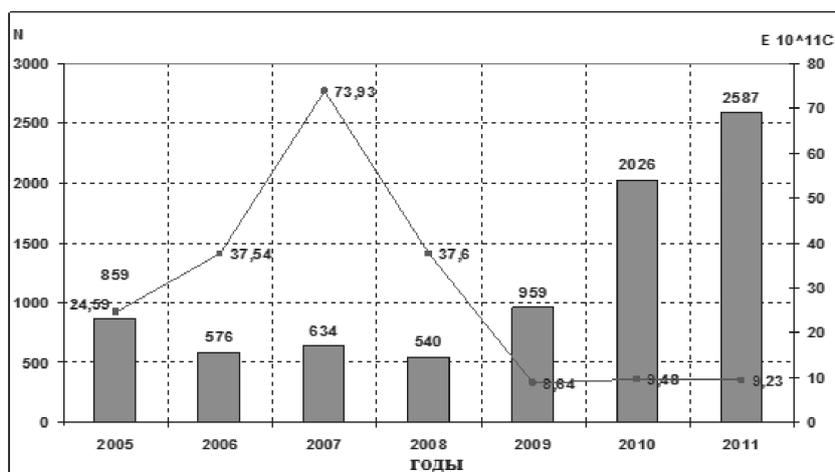


Рис. 2. График распределения количества землетрясений и выделившейся энергии по годам за период 2005–2011 гг.

Ирана, смежной с Нахчыванской АР. В акватории Каспийского моря сгущения наблюдаются в северной азербайджанской части, вокруг Абшеронского полуострова, в центральной части Каспийского моря (рис. 3, 4).

В 2011 г. напряженная ситуация сложилась в Гобустане. В марте и июле здесь зарегистрированы рои землетрясений, среди которых были и ощутимые с $m_l \geq 4,0$. Эта область расположена на стыке структур Большого Кавказа и Куринской депрессии (рис. 5).

Как видно из карты эпицентров (рис. 5), на Абшеронском полуострове не зарегистрированы сейсмические события. Однако потенциально опасными являются очаги землетрясений, расположенные в Каспийском море вокруг полуострова. Достаточно вспомнить проявления на поверхности Каспийского землетрясения 25.11.2000 г. с $M = 6,2$.

Очаги землетрясений за период 2005–2011 гг. (рис. 2), расположенные в центральной части Каспийского моря, являются также потенциально опасными для нефтяных платформ. Расположение их эпицентров в направлении СВ–ЮЗ указывает на активизацию в последние годы поперечной Северо-Восточно-Талыш-Карабогазской системы глубинных разломов [1].

Достаточно высокой сейсмичностью характеризуются также зоны Малого Кавказа и Талышской горной системы, хотя и уступают по уровню сейсмической активности зонам Большого Кавказа и Каспийского моря.

Высокая сейсмичность территории республики обусловлена подвижками в активных частях глубинных разломов.

С целью изучения полей напряжений и деформаций земной коры проводится анализ механизмов очагов землетрясений (рис. 6).

Механизмы очагов были рассчитаны на программе “FPFIT” системы “Kinematics”.

На рис. 7 приводится пример построение механизма очага землетрясения в формате 3D.

Анализ механизмов очагов землетрясений показал, что на территории континентальной части Азербайджана преобладают как взбросовые, так и сбросовые подвижки с элементами сдвига. На территории Каспийской впадины все механизмы относятся к двум типам: сбросам и сдвигам.

Взбросовые подвижки характерны в основном для юго-восточного погружения Большого Кавказа, а сбросо-сдвиговые подвижки преобладают в Нижнекуринской впадине.

С целью изучения скоростных неоднородностей земной коры исследуемого региона методом сейсмотомографии построена новая скоростная модель для территории Азербайджана по данным сети телеметрических станций (рис. 8).

Построение 1D-модели, расчет стационарных поправок и перелокация событий производились на программе Velest, построение 3D модели — на программе TomoTetraFD [3].

Основными критериями оптимальности скоростной модели считалась близость среднеквадратичной невязки (отклонение времен пробега волн от используемой скоростной модели) для всех лучей к нулю.

Исследуемый объем до глубины 60 км был разбит на мелкие слои толщиной 2 км

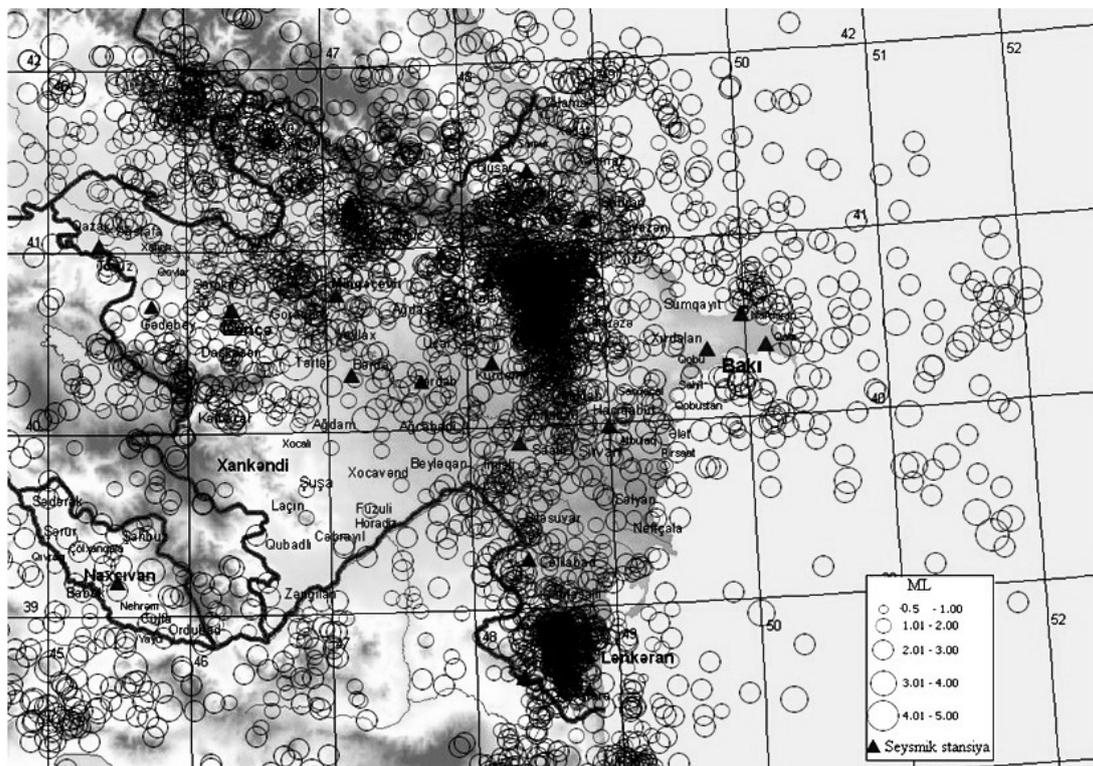


Рис. 3. Карта эпицентров землетрясений Азербайджана за 2005–2011 гг.

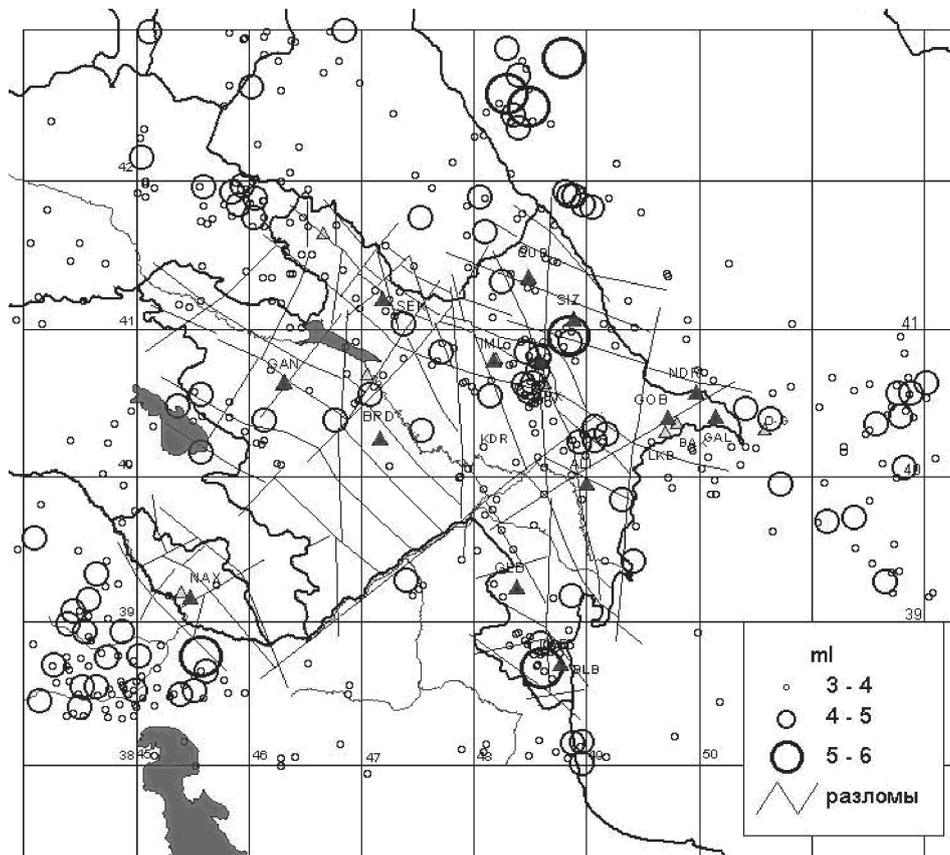


Рис. 4. Карта эпицентров землетрясений Азербайджана за 2005–2011 гг. ($ml \geq 3,0$)

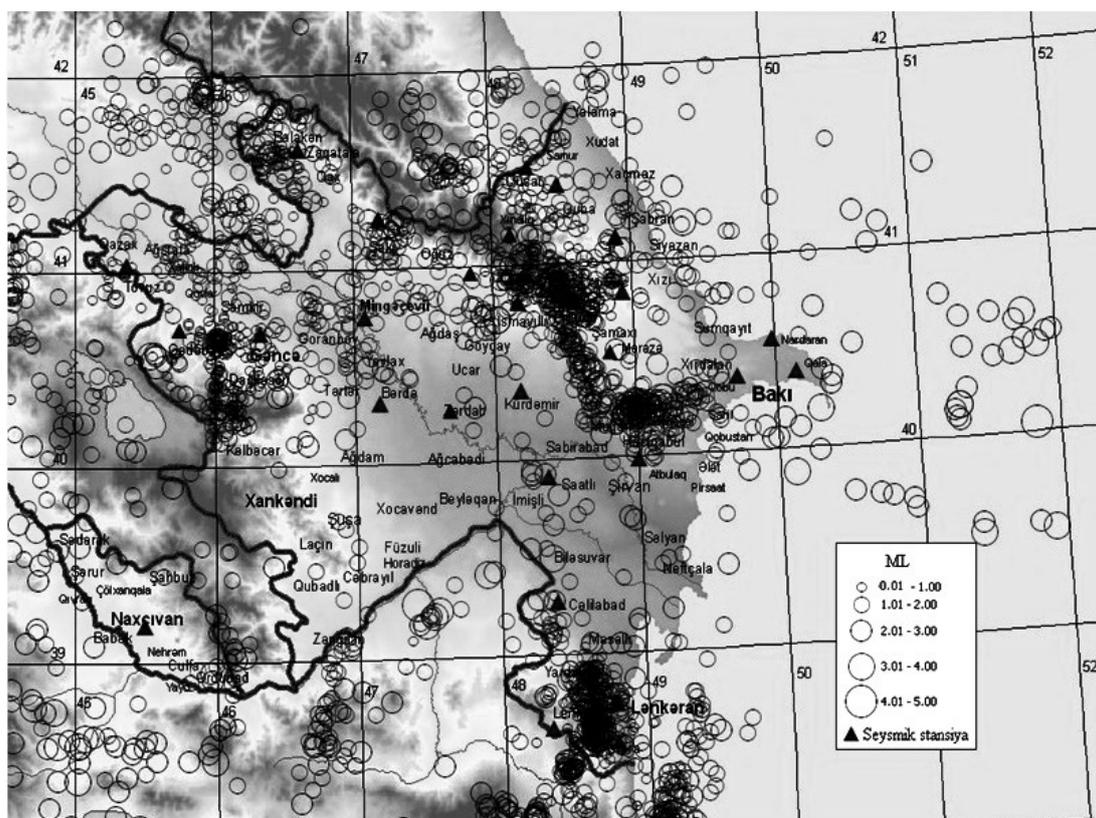


Рис. 5. Карта эпицентров землетрясений Азербайджана за 2011 г.

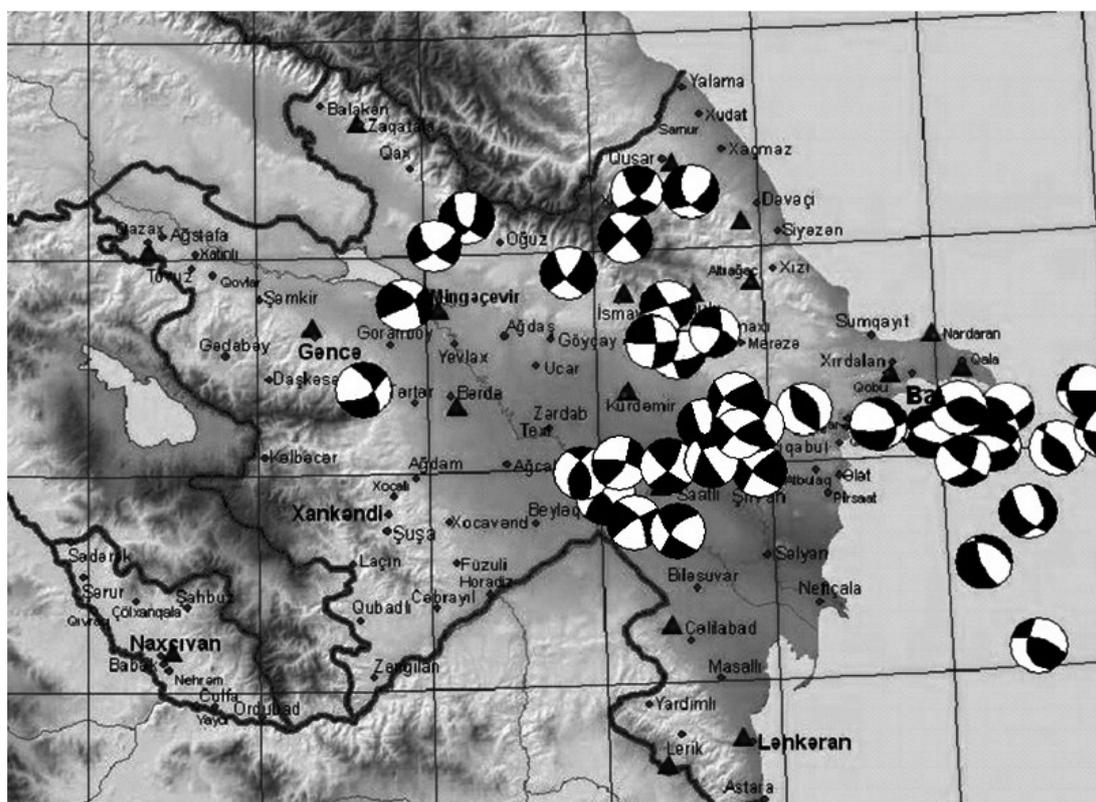


Рис. 6. Механизмы очагов землетрясений Азербайджана с $ml > 2,5$ за период 2005–2011 гг.

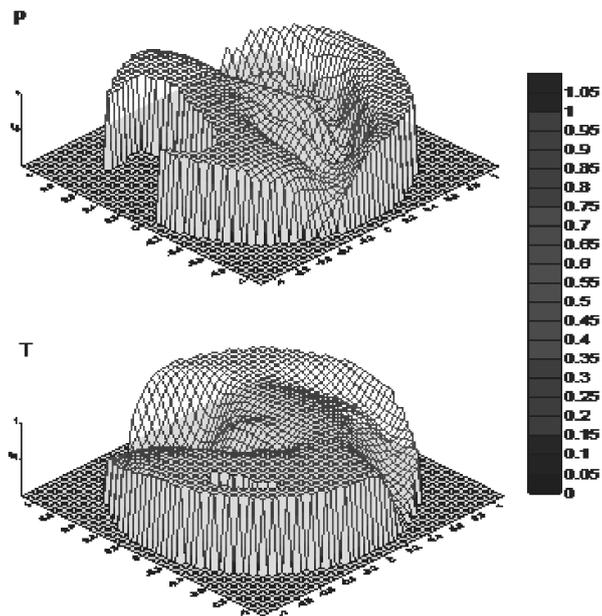


Рис. 7. Трехмерная модель механизма очага землетрясения 01.01.2010 ($M = 4,6$, Каспийское море)

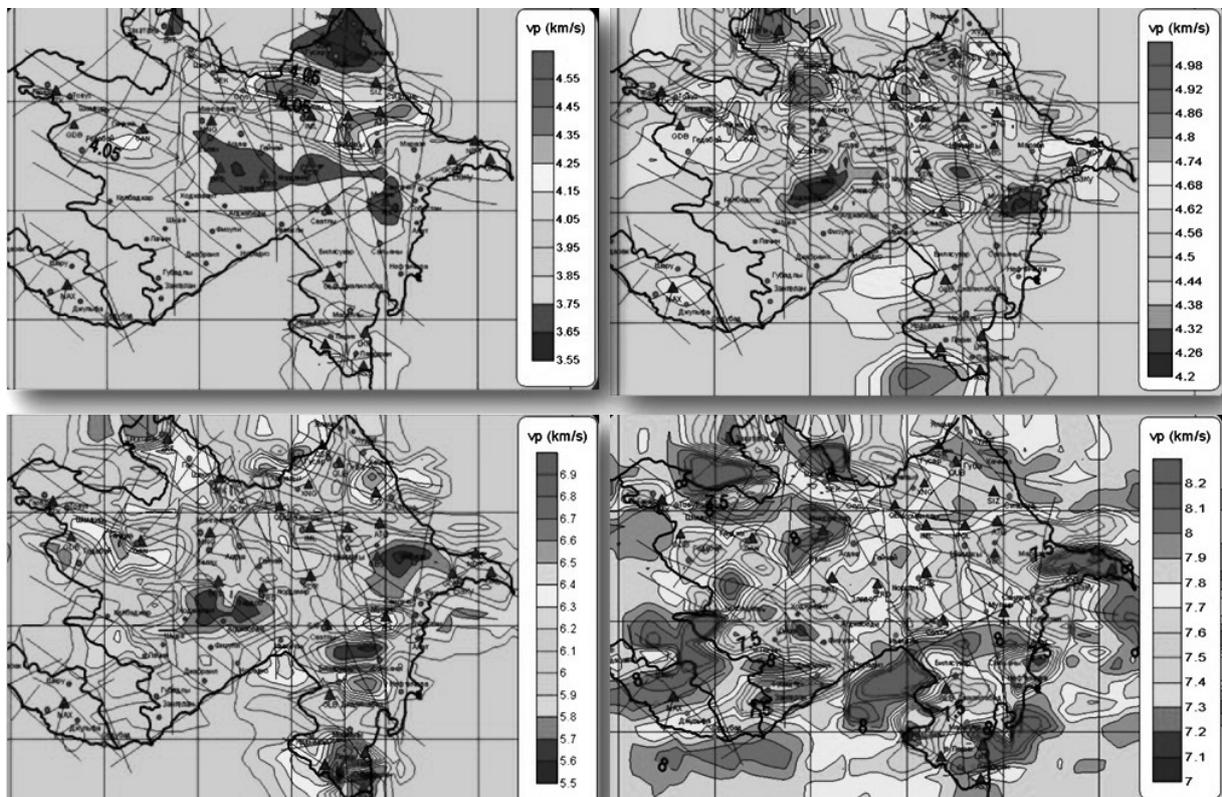


Рис. 8. Горизонтальный срез скоростной модели территории Азербайджана на глубине 3, 8, 15, 40 км

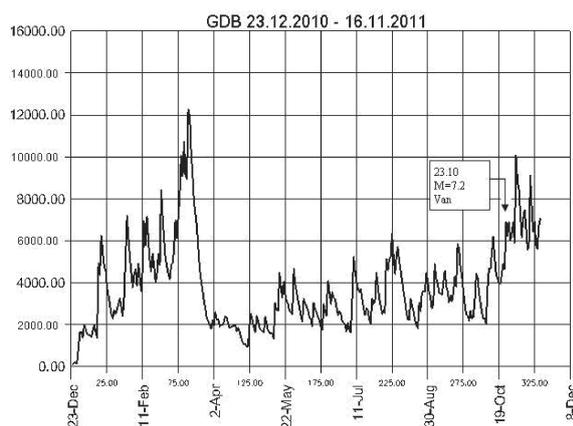


Рис. 9. Прогностическая кривая V_P/V_S , полученная перед землетрясением, произошедшим в Турции (оз. Ван) 23.10.11 г. $m_l = 7,2$ по станции Кедабек

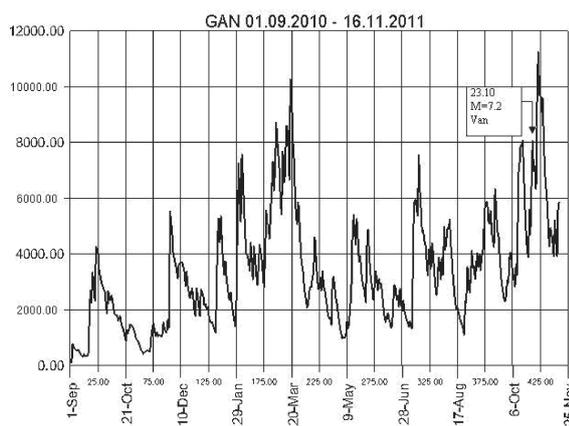


Рис. 10. Прогностическая кривая V_P/V_S , полученная перед землетрясением, произошедшим в Турции (оз. Ван) 23.10.11 г. $m_l = 7,2$ по станции Ганджа

в интервале глубин 0–10 км и толщиной 5–10 км в интервале глубин 10–60 км. В ходе исследования рассматривались сейсмологические данные о параметрах локальных землетрясений и временах прихода P и S волн, зарегистрированных сетью телеметрических станций за период 2004–2011 гг.

Опираясь на полученные данные, можно отметить, что первый интервал от 0 до 10 км связан с границей кайназойских и мезозойских отложений в осадочном чехле и характеризуется значениями скоростей 2,8–5,9 км/с, второй (10–25 км) — с кровлей консолидированной части земной коры (гранитный слой), характеризующиеся значениями скоростей 6–7,3 км/с, третий (25–40) — относится к базальтовому слою со скоростями 7,4–7,8 км/с, четвертый (> 40 км) связан с верхней границей Мохо (8–8,2 км/с).

С целью выявления потенциальных зон сильных землетрясений и прогноза сейсмической активизации с 2005 г. анализируются результаты расчетов кинематического предвестника Vp/Vs [2].

Мониторинг и расчет кинематического параметра τ оценивается в двух модификациях — краткосрочном варианте в виде кривой вариации параметра τ во времени и в долгосрочном аспекте в виде результатов картирования по площади параметра $\xi\tau$.

Прогностические кривые рассчитываются и анализируются в оперативном режиме, близком к реальному времени. Установлено, что кинематические предвестники предваряют сильные события в интервале времени от 1 сут. до 10–20 дней. На прогностических кривых Vp/Vs ряда станций наблюдаются

хорошие аномалии, указывающие на сильное землетрясение с $M = 7,2$ в районе Ван-Восточная Турция. В качестве примера показаны кривые ст. Гянджа и Гядабей (рис. 9, 10).

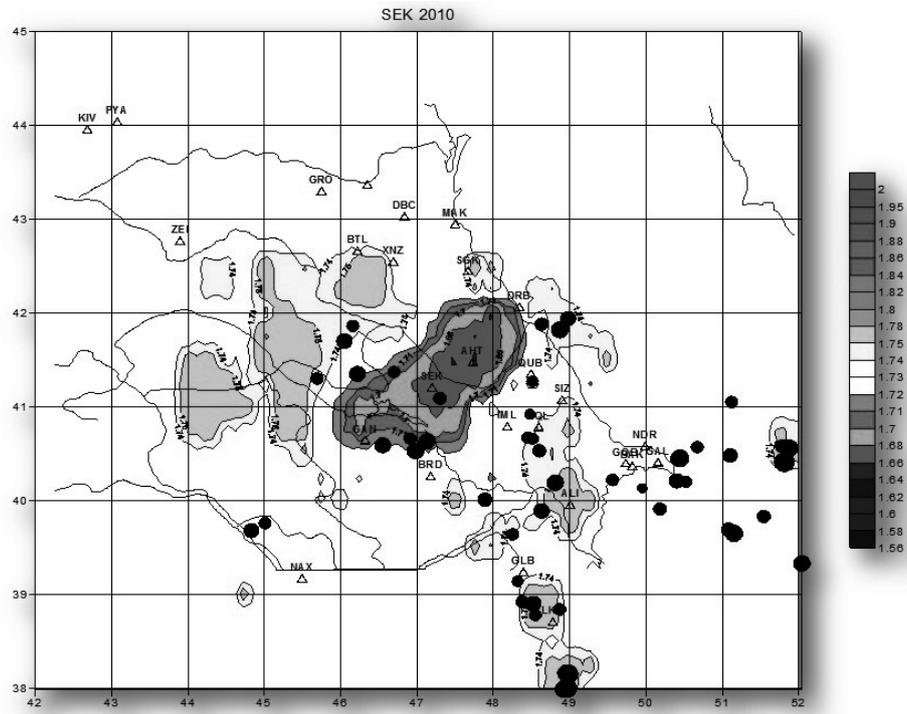
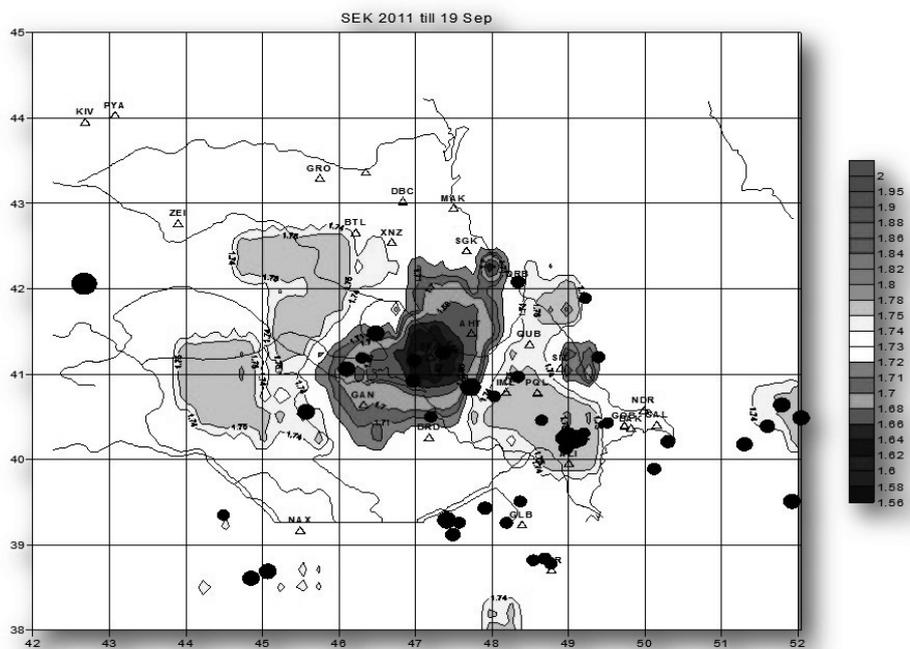
Наблюдая параметр $\xi\tau$ в пространстве и во времени, можно выявить временной интервал, где значения флуктуаций максимальны, а проводя картирование параметра по площади — оконтурить аномальную зону.

Проводя сравнение результатов расчета карт параметра, можно выделить области, где обширные отрицательные аномалии наблюдаются на ряде станций в течение длительного времени. Это, в первую очередь, аномалии вблизи Шемахи. Еще одним прогностическим признаком готовящегося землетрясения является наличие градиентных зон — участков смены знака аномалии с положительных на отрицательные. На представленных картах это области Шеки-Шемахи и приграничная область с Дагестаном (рис. 11, 12).

Долгосрочный предвестник формирует аномальную зону за время от нескольких месяцев до 5–10 лет в зависимости от тектонического строения региона и энергии готовящегося события. Это позволяет развернуть систему наблюдений за краткосрочными предвестниками.

2. Сейсмомагнитометрические исследования

Сейсмомагнитометрические исследования проводятся в двух направлениях:

Рис. 11. Карта параметра $\xi\tau$ по станции Шеки в 2010 г.Рис. 12. Карта параметра $\xi\tau$ по станции Шеки в 2011 г.

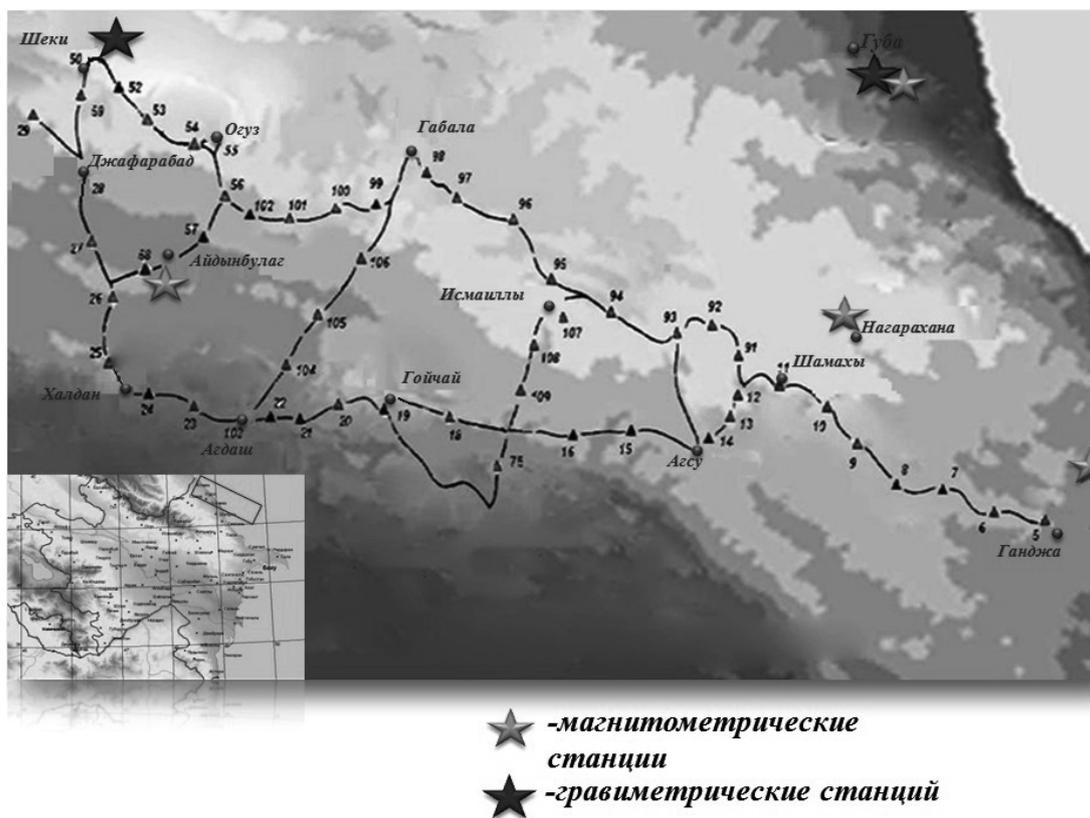


Рис. 13. Схема расположения магнитометрических и гравиметрических станций

1) мониторинг вариаций напряженности модуля вектора \mathbf{T} геомагнитного поля с целью выявления аномального сейсмомагнитного эффекта;

2) мониторинг приращения градиента напряженности геомагнитного поля с целью выявления зон с напряженно-деформированным состоянием, т.е. сейсмогенных зон (рис. 13).

Практика последних 30-ти лет позволила создать банк данных в электронном виде, где хранятся все выявленные сейсмоаномальные эффекты, проявившиеся перед землетрясениями $M \geq 4 - 6, 5$.

При этом установлен радиус действия сейсмомагнитного сигнала ($R = 100, 5 - 1, 27$ км), форма проявления эффекта (бухтообразное изменение поля на фоне нормированной напряженности \mathbf{T}), продолжительность эффекта (120–360 часов при доверительном интервале порядка 180 часов), амплитуда сейсмомагнитного эффекта (20–40 нТл) [4].

Следует отметить, что статистическая значимость выявленных сейсмомагнитных эффектов составляет $\rho = 0, 87$. Этот факт свидетельствует о наличии причинно-следственной связи между сейсмомагнитных эф-

фектом и землетрясением. Другими словами, это указывает на сеймотектоническую или тектономагнитную природу аномальных сейсмомагнитных эффектов.

Работы по выявлению зон с напряженно-деформированным состоянием, т.е. сейсмогенных зон на основе мониторинга приращения градиента напряженности геомагнитного поля позволили оконтурить три основные сейсмогенные зоны в области южного склона юго-восточного погружения Б. Кавказа. Это Шекинская, Исмаиллинская и Шамахинская зоны. Также вырисовывается Айдынбулаг-Агдашская зона, где напряженное состояние несколько ниже трёх других сейсмогенных зон (рис. 14, 15).

Все эти зоны приурочены к узлам пересечения поперечных и продольных глубинных разломов, где аккумулируется избыточное упругое напряжение.

Следует отметить, что, как правило, подавляющее число ощутимых, средней силы и даже слабых землетрясений на полигоне работ реализуется именно в пределах границ напряженно-деформированных зон, выявленных по магнитным данным [4].

Анализ данных за последние пять лет показывает, что накопление сейсмической энер-

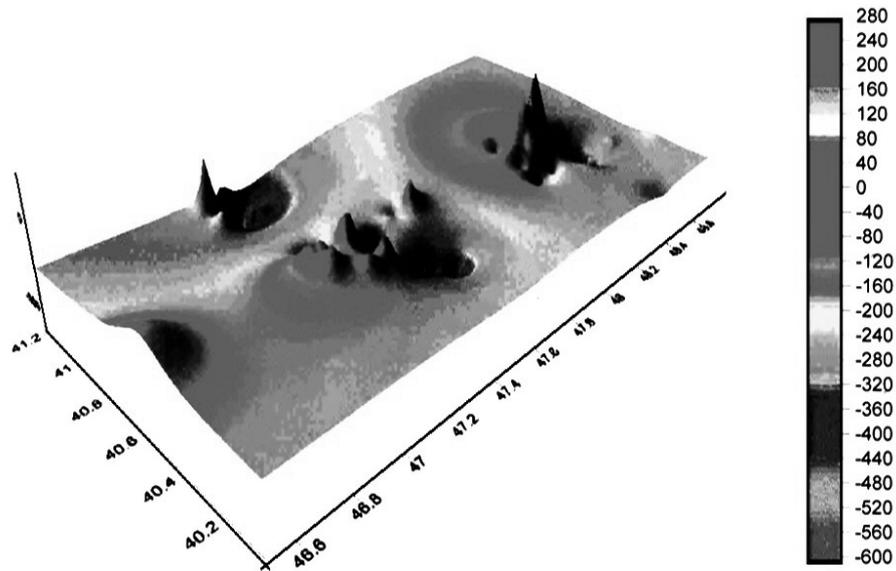


Рис. 14. Зоны напряженно-деформированного состояния, полученные на основе повышения градиента напряженности геомагнитного поля

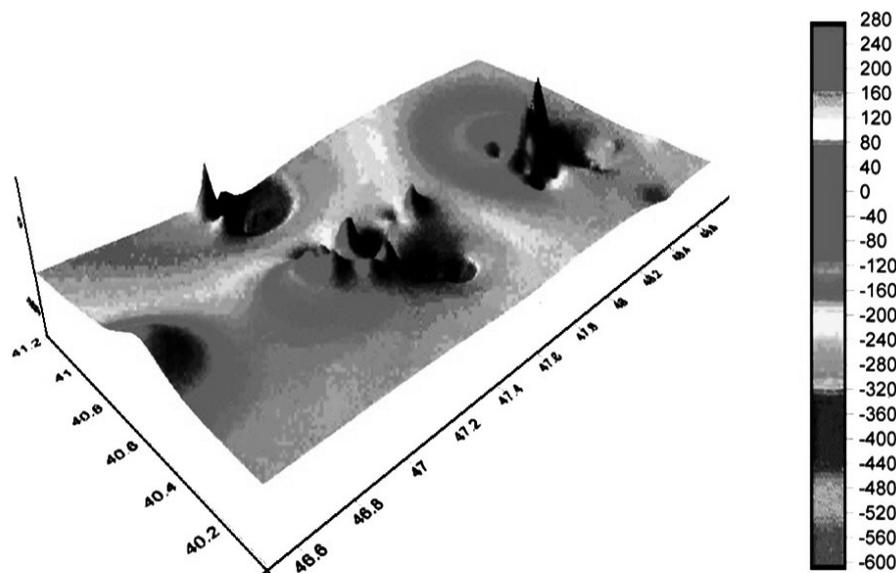


Рис. 15. 3D-модель пространственно-временного распределения градиента напряженности геомагнитного поля ($\delta\Delta T$)

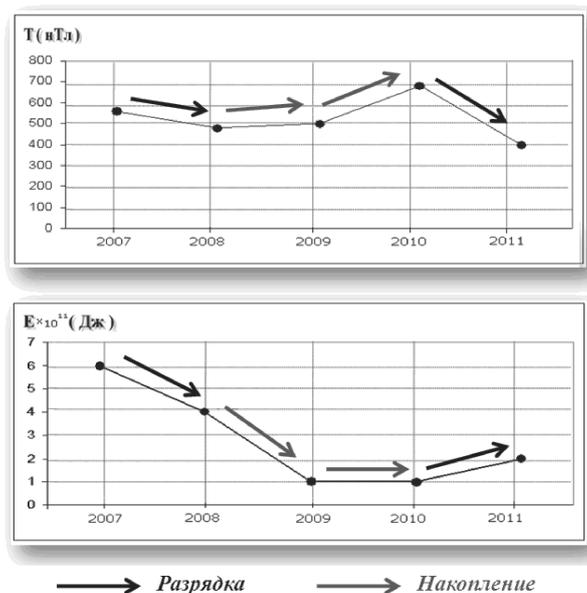


Рис. 16. Графики изменения напряженности геомагнитного поля T и сейсмической энергии E за 2007–2011 гг.

гии E происходит на фоне роста напряженности геомагнитного поля. При реализации сейсмических событий и выделении сейсмической энергии E наблюдается спад напряженности геомагнитного поля, что вполне логично. Эти два процесса зеркально отображают сеймотектоническую активность в сейсмогенных зонах. Просматривается 2-х летняя цикличность этих двух процессов (рис. 16).

Таким образом, оценка напряженно-деформированного состояния геологической среды по геомагнитным данным может быть пригодна для долгосрочного прогноза сейсмической активности данного региона.

Гравиметрические исследования включают в себя мониторинг вторых производных гравитационного потенциала ($2W_{xy}$; W_{Δ} ; W_{xz} ; W_{yz}) и неприливных вариаций силы тяжести на Шеки-Шамахинском геодинамическом полигоне.

Характерные аномальные изменения вторых производных гравитационного потенциала наблюдались в период подготовки ряда землетрясений в Шекинском, Губинском и других районах республики [6].

Вызывают особый интерес изменения неприливных вариаций силы тяжести на профиле Исмаиллы-Гарамарьям-Мюссюсли в пределах Шамахи-Исмаиллинской сейсмогенной зоны (рис. 17) [5].

Наблюдения за неприливыми вариациями силы тяжести в Шамахи-Исмаиллинской

сейсмогенной зоне за последние 3–4 года выявили рост значения Δg .

Анализ имеющегося материала даёт основание полагать, что вдоль профиля Исмаиллы-Гарамарьям-Мюссюсли и в пределах Шамахинской сейсмогенной зоны продолжают процессы перераспределения и уплотнения глубинных масс горных пород.

Этот факт свидетельствует о большой вероятности проявления сеймотектонических подвижек на участке пересечения Западно-Каспийского поперечного разлома с Северо-Аджинаурским продольным разломом.

Сейсмогеохимические исследования представлены круглогодичным сейсмогеохимическим мониторингом флюидов, который проводится гидро-, газо- и радиогеохимическими методами.

Объектом исследований являются подземные воды, растворённые газы и локальные участки поверхности Земли в 5-ти сейсмоактивных регионах Азербайджана (рис. 18).

Одновременно на побережье Каспия изучается ионно-солевой состав морской воды. На основе комплексного анализа установлено влияние сейсмического поля сильных и катастрофических ($K \geq 13$; $M \geq 5,5$) землетрясений в очаговых зонах Альпийско-Гималайского тектонического пояса Земли на геохимические поля флюидов Азербайджана [7].

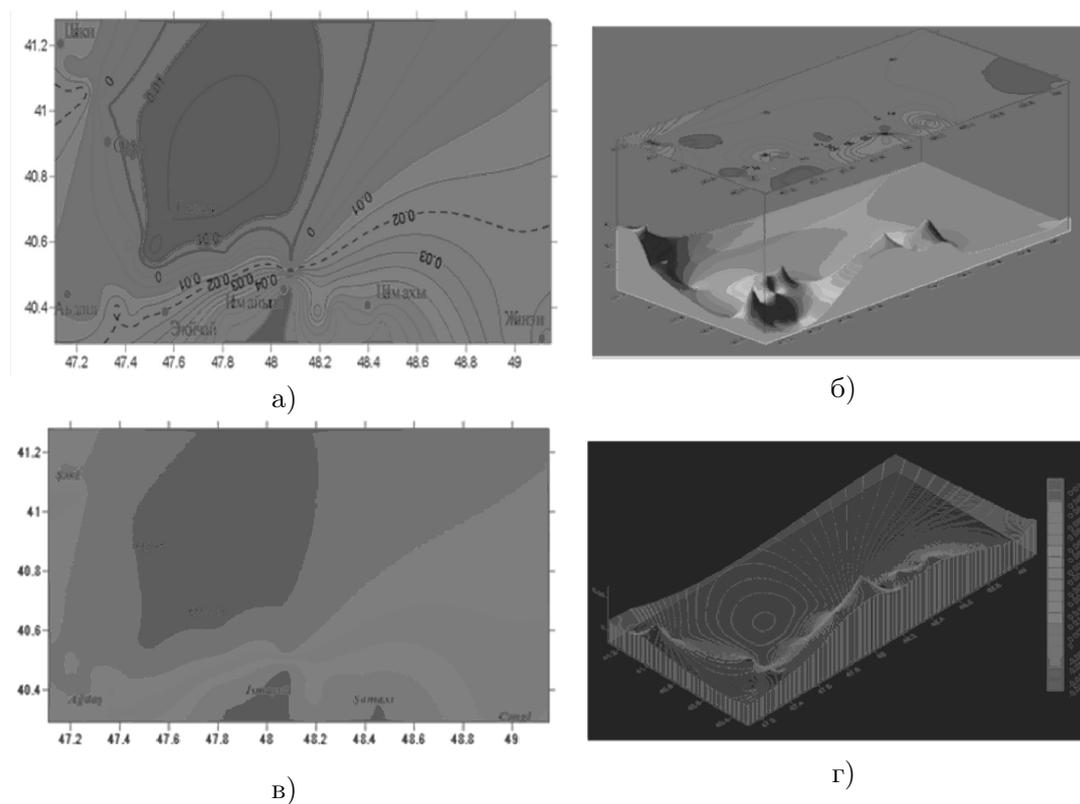


Рис. 17. а) Карта изменения гравитационного поля Шеки-Шамахинского геодинамического полигона за 2009–2010 гг.; б) 3D-модель интенсивного повышения гравитационного поля в Шамахи-Исмаиллинской сейсмогенной зоне; в) 3D графика интенсивного повышения гравитационного поля в Шамахи-Исмаиллинской сейсмогенной зоне; г) Спектральный анализ интенсивного повышения гравитационного поля в Шамахи-Исмаиллинской зоне

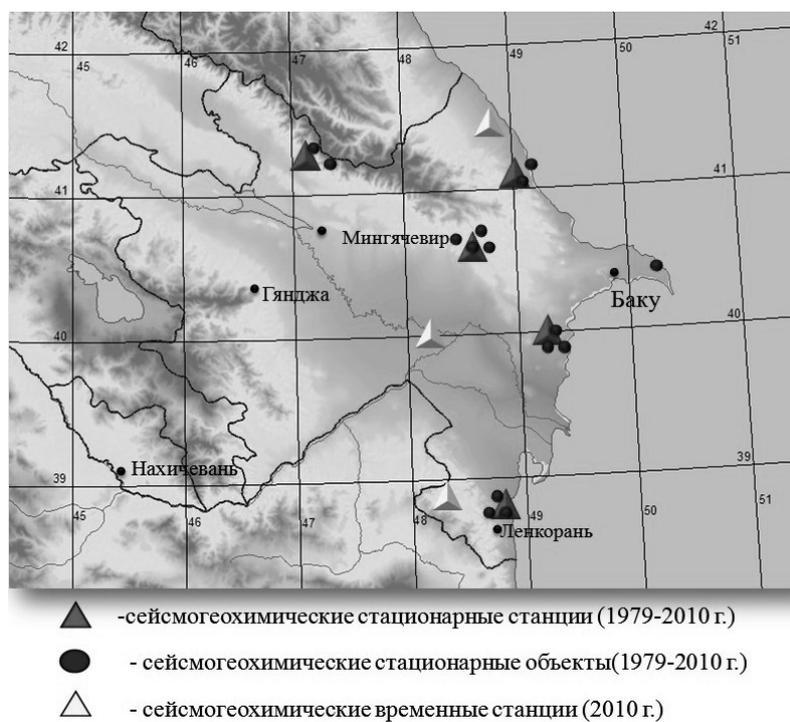


Рис. 18. Схема расположения геохимических станций

Габала и Шеки-Загатальская зоны. Выявлена новая Гобустанская зона сейсмической активности в районе сочленения Б. Кавказа и Куринской депрессии. Повышенная сейсмическая активность сохраняется в северной части М.Кавказа (Талыш) и на пограничной с Ираном территории Нахчиванской АР. Повышенной сейсмической активностью отмечается центральная часть Каспийского бассейна.

2. По аномальным изменениям геомагнитного и гравитационного полей на южном склоне Б. Кавказа выявлены зоны напряженно-деформированного состояния, приуроченные к отдельным участкам поперечных и продольных глубинных разломов. Это Шеки-Загатальская, Шамаха-Исмаиллинская и Айдынбулаг-Агдашская зоны. Накопление и разрядка здесь избыточных упругих напряжений является причиной проявления в этих зонах высокой сейсмической активности, что подтверждается результатами и сейсмологических наблюдений.

3. Установлено, что сейсмическое поле сильных и катастрофических ($M \geq 5,5$; $K \geq 13$) землетрясений в очаговых зонах Альпийского тектонического пояса Земли влияет на геохимические поля флюидов Азербайджана; информативные сейсмогеохимические параметры индивидуальны для каждого конкретного сейсмического очага;

4. Разработана новая технология компьютерной обработки и комплексной интерпретации данных круглогодичного сейсмогеохимического мониторинга флюидов в реальном режиме времени "SEISMOGEOCHEMICAL on-line".

Литература

1. *Етирмишли Г. Д.* Сейсмичность Южно-Каспийской впадины (Азербайджанский сектор). Дисс. ... д-ра геол.-минерал. наук. Баку, 2010. 220 с.
2. *Славина Л. Б., Кузмина Т. А., Мячкин В. В.* К вопросу о времени и месте возникновения кинематических предвестников сильных землетрясений // Сб. «Модельные и натурные исследования очагов землетрясений». М.: Наука, 1991. С. 71–78.
3. *Усольцева О. А., Казымова С. Э., Казымов И. Э.* Сейсотомографическое исследование коры юго-востока Кавказа с использованием триангуляции Делоне по данным времен пробега Р-волн // Сборник научных трудов «Динамические процессы в геосферах». ИДГ РАН. М.: Наука, 2010. С. 140–147.
4. *Рзаев А. Г.* Сейсмопрогностические исследования. В кн. «Геология Азербайджана» // Физика Земли. Т. 5. Баку: Nafta-Press. 2002. С. 23–35.
5. *Рзаев А. Г.* Исследования тектономагнитных эффектов в зонах с высокой геодинамической активностью // «Проблемы сейсмологии в Узбекистане». № 7. Т. 1. Ташкент. 2010. С. 82–93.
6. *Тагиев Т. Ш.* Исследования гравитационных предвестников землетрясений. В кн. «Геология Азербайджана» // Физика Земли. Т. 5. Баку: Nafta-Press, 2002. С. 35–41.
7. *Гасанов А. Г., Керимова Р. А.* Сейсмогеохимические исследования. В кн. «Геология Азербайджана» // Физика Земли. Т. 5. Баку: Nafta-Press, 2002. С. 53–67.
8. *Керимова Р. А.* Сейсмичность и геохимические поля флюидов Азербайджана. Дисс. ... д-ра геол.-минерал. наук. М., 2004. 163 с.

Ключевые слова: землетрясения, сейсмичность, геофизические поля, геохимические поля, скоростная модель, цифровые сейсмостанции.

Статья поступила 19 декабря 2011 г.

Республиканский центр сейсмологической службы Национальной академии наук Азербайджана, г. Баку, Республика Азербайджан

© Етирмишли Г. Д., Рзаев А. Г., Керимова Р. А., Абдуллаева Р. Р., Казымова С. Э., 2012