УДК 550.34.06

СЕЙСМОГЕННЫЕ ДРЕВНИЕ СТРУКТУРЫ ЦЕНТРА И СЕВЕРА ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Академик РАН В. В. Адушкин^{1,2}, И. А. Санина¹, Г. Н. Иванченко¹, Э. М. Горбунова^{1,*},
И. П. Габсатарова³, Н. Л. Константиновская¹, М. А. Нестеркина¹

Поступило 26.06.2019 г.

Выполнен анализ расположения эпицентров землетрясений, произошедших в центральной и северной частях Восточно-Европейской платформы в 2009–2016 гг., зарегистрированных сейсмическими станциями ФИЦ ЕГС РАН и малоапертурной группой ИДГ РАН “Михнево”. Полученные результаты косвенно свидетельствуют о сейсмической активности рифейских структур региона, осложняющих поверхность фундамента, и их возможной активизации в настоящее время. Имеющиеся данные об исторических землетрясениях также подтверждают их приуроченность к палеорифтам. Представляется целесообразным учитывать положение древних авлакогенов при оценке сейсмоопасности Восточно-Европейской платформы.

Ключевые слова: эпицентры землетрясений, авлакогены, сейсмическая активность, сейсмическая опасность.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524894405-408>

Проведена систематизация данных о расположении землетрясений, произошедших в центральной и северной частях Восточно-Европейской платформы (ВЕП). Ранее была отмечена активизация Днепровско-Донецкого авлакогена [1], Кировско-Кажимского [2] и Онежско-Кандалакшского [3] палеорифтов, которые приурочены к периферии ВЕП. В 2011–2016 гг. в Пачелмском и Солигаличском авлакогенах зарегистрированы землетрясения с магнитудами (М) 2,1–3,8. Малоапертурной группой ИДГ РАН “Михнево” (МСГ “Михнево”) 13.09.2013 г. выделено сейсмическое событие с М 2,85 в Валдайском авлакогене. Результаты выполненных исследований позволяют предположить неотектоническую активность системы палеорифтов ВЕП.

В доинструментальный период (1542–1939 гг.) по макросейсмическим данным в этом регионе были определены эпицентры исторических землетрясений с М 2–6. Большинство событий с учётом точности локации расположено в авлакогенах и сопряжённых структурах (рис. 1).

Наряду с землетрясениями в центральной и северной частях ВЕП зарегистрированы сейсмические события, связанные с разработкой месторождений полезных ископаемых с использованием взрывных технологий. В пределах ВЕП в 1971, 1985 и 1988 гг. были проведены мирные ядерные взрывы с целью глубинного зондирования земной коры.

Преимущественная приуроченность очагов к палеорифтам установлена и в период наблюдений с 1970 по 2016 г., который характеризуется последующим расширением и модернизацией сейсмических сетей. Особое место в наблюдательной сейсмической сети в районах слабой сейсмичности отводится специально сформированным высокочувствительным группам сейсмических датчиков, при суммарной обработке записей которых значительно понижается уровень шума и соответственно улучшается качество выделения полезного сигнала.

За 15 лет сейсмических наблюдений, проводимых МСГ “Михнево”, сформирована уникальная база волновых форм, состоящая из трёх групп сейсмических событий, к которым отнесены карьерные взрывы, землетрясения и события неизвестной природы. Дальнейшая обработка сейсмических записей, полученных МСГ “Михнево”, совместно с данными сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН позволила определить местоположения эпицентров шести землетрясений в пределах центральной и северной частей ВЕП. Генезис одного события 13.09.2013 г. с М 2,85, выделенного только по данным регистрации МСГ “Михнево”, не был определён в про-

¹ Институт динамики геосфер
Российской Академии наук, Москва

² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет),
Долгопрудный Московской обл.

³ Федеральный исследовательский центр
“Единая геофизическая служба Российской Академии наук”,
Обнинск Калужской обл.

*E-mail: emgorbunova@bk.ru

Рис. 1. Карта-схема расположения сейсмических событий (подоснова — синтетическая схема поверхности фундамента центральной и северной частей ВЕП: 1 — разломы кристаллического фундамента; 2 — Балтийский щит; 3 — землетрясение и дата регистрации: а — сейсмической сетью, б — одной станцией, в — МСГ “Михнево” (MHVAR); 4 — историческое землетрясение и дата, определённые: а — по нескольким письменным свидетельствам, б — по одному источнику; 5 — карьер; 6 — место и дата мирного ядерного взрыва, проведённого с целью глубинного сейсмического зондирования; 7 — сейсмические станции ФИЦ ЕГС РАН с международным/региональным кодом; 8 — древние структуры — авлакогены: I — Валдайский, II — Солигаличский, III — Котласский, IV — Нюхчинский, V — Онежско-Кандалакшский, VI — Лешуковский, VII — Кировско-Кажимский, VIII — Пачелмский и IX — Котельничский выступ.

цессе рутинной обработки, но установлено, что его волновая форма подобна записям, полученным ранее при регистрации событий в пределах Днепровско-Донецкого авлакогена [1].

Из анализируемых семи событий пять приурочено к системе рифейских авлакогенов и два — к западному склону Котельничского выступа (рис. 1). Очаг землетрясения 28.03.2013 г. с М 3,4 тяготеет к бортовому глубинному разлому, ограничивающему Онежско-Кандалакшский авлакоген с востока. Видимая мощность венд-фанерозойского осадочного чехла в пределах авлакогена плавно возрастает в ЮВ-направлении от 1,2 до 4 км. Мощность осад-

ков над гипоцентром землетрясения достигает 1,7 км. Фокальный механизм определён как double couple [3].

По геологическим данным в среднем и верхнем девоне в пределах Кировско-Кажимского авлакогена отмечено базальт-долеритовое проявление магматизма, которое косвенно указывает на геодинамическую активизацию рассматриваемого палеорифта. В пределах Кировско-Кажимского авлакогена и сопряжённых с ним глубинных структур прослежено большое количество исторических и современных землетрясений [2]. Кировско-Кажимский авлакоген протягивается в СВ-направлении и разбит вкрест

простираения серий глубинных разломов СЗ-ориентировки на отдельные блоки. Мощность осадочного чехла возрастает в северо-восточном направлении от 2,2 до 5 км к зоне сочленения с Предтиманским прогибом. Внутреннее строение Кировско-Кажимского авлакогена можно определить как ступенчато-блоковое. Два землетрясения, зарегистрированные 20.10.2009 г. с M 3,9 и 25.04.2011 г. с M 2,85, приурочены к прибортовым разломам, ограничивающим рассматриваемый авлакоген с северо-запада. Последнее событие тяготеет к зоне пересечения ортогональных разломов.

К СЗ-склону Котельнического выступа, субпараллельного Кировско-Кажимскому авлакогену, приурочены два землетрясения 03.07.2015 г. с M 3,4 и 05.07.2015 г. с M 3,2. Мощность осадочного чехла постепенно возрастает по направлению к Солигаличскому авлакогену от 1,6 до 2,4 км. В пределах СЗ-борта Солигаличского авлакогена, осложнённого субпараллельными глубинными разломами северо-восточного простираения, зарегистрировано землетрясение 23.06.2016 г. с M 3,8. Мощность осадочного чехла увеличивается от 3,8 до 4 км к осевой части авлакогена.

Сейсмическое событие 13.09.2013 г. с M 2,85 выделено только МСГ “Михнево” в пределах Валдайского авлакогена, который отличается асимметричным строением днища и бортов, клавишно-блоковой структурой, определяющей вариации мощности осадочного чехла от 1 до 3,6 км. Валдайский авлакоген совместно с Солигаличским входит в состав единой системы палеорифтов, протягивающихся в северо-восточном направлении.

Для определения природы этого сейсмического события, зарегистрированного на эпицентральной расстоянии 361 км от МСГ “Михнево”, был использован критерий $\lg(Pg/Lg)$ [1]. Проведено сравнение значений $\lg(Pg/Lg)$, полученных для известных землетрясений, произошедших 03.07.2015 г. в районе Котельнического выступа (г. Йошкар-Ола) и 23.06.2016 г. в пределах Солигаличского авлакогена (Костромская область) на расстояниях 561 и 643 км от МСГ “Михнево” соответственно.

Установлено подобие графиков логарифма спектрального отношения $\lg(Pg/Lg)$, рассчитанного для события 13.09.2013 г. в Валдайском авлакогене, с данными, полученными для двух вышеперечисленных землетрясений в широкой полосе частот от 4 до 13 Гц (именно в этой полосе отношение сигнал/шум более 3), рис. 2а. В полосе частот 10–18 Гц формы трёх кривых близки к значениям, полученным по записям Мариупольского землетрясения 07.08.2016 г., различия значений $\lg(Pg/Lg)$ не превышают 0,2.

При сравнении результатов обработки всех событий в авлакогенах с учётом критерия $\lg(Pg/Lg)$ отмечается сопоставимость форм кривых, характеризующих эти события и известные землетрясения в диапазоне частот 4–13 Гц (рис. 2б), что может служить дополнительным косвенным признаком, подтверждающим их тектонический генезис.

Можно предположить, что современная сейсмичность, пространственно связанная с авлакогенами, определяется активизацией этих структур, вызванной влиянием сопредельных складчатых зон, обрамляющих с юга Восточно-Европейскую плат-

Рис. 2. Зависимость значений логарифма спектрального отношения Pg/Lg от частоты по записям центрального элемента для землетрясений: а — в пределах Валдайского 13.09.2013 г. и Солигаличского 23.06.2016 г. авлакогенов, Котельнического выступа 03.07.2015 г. и в районе г. Мариуполь 07.08.2016 г.; б — в пределах авлакогенов: Кировско-Кажимского 20.10.2009 г., 25.04.2011 г., Онежско-Канда拉克шского 28.03.2013 г., Валдайского 13.09.2013 г. и Солигаличского 23.06.2016 г.

форму. В пределах этих подвижных поясов, которые характеризуются неотектоническими движениями различных знаков и иерархической соподчинённости, отмечается тектоническая активизация пасаденской фазы складчатости, охватывающая последние 0,5 млн лет [4]. Землетрясение 07.08.2016 г. в районе г. Мариуполя, которое было привлечено к анализу форм записей сейсмических событий, возможно, было спровоцировано альпийским тектогенезом [5].

По картам Общего сейсмического районирования (ОСР-97, ОСР-2015 А, В, С) вся территория ВЕП отнесена к региону с пятибалльной интенсивностью землетрясений. Однако более детальные построения по вероятностным картам D, E, F, для которых степень сейсмической опасности соответствует вероятностям 2, 1 и 0,5% возможного превышения расчётных максимальных значений интенсивности в течение 50-летних интервалов времени, показывают возрастание интенсивности до 6 баллов для районов Поволжья, Приуралья и севера ВЕП [6].

На основе выполненного анализа приуроченности очагов землетрясений к авлакогенам представляется актуальным учёт тектонической активизации этих древних структур при оценке сейсмоопасности ВЕП.

Благодарности. Работа посвящена 15-летию создания малоапертурной сейсмической группы ИДГ РАН “Михнево”.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ИДГ РАН № 0146–2019–0004, ФИЦ ЕГС РАН № 075–00453–19–01 и при финансовой поддержке РНФ (проект № 16–17–00095).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В.В., Санина И.А., Габсатарова И.П. и др. // ДАН. 2016. Т. 469. № 4. С. 479–482. DOI: 10.7868/S0869565216220151.
2. Удоратин В.В., Носкова Н.Н. Глубинное строение и сейсмичность Кировско-Кажимского авлакогена. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2018. 208 с. ISBN 978-5-98491-077-4.
3. Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Конечная Я.В. // Физика Земли. 2016. № 4. С. 52–66. DOI: 10.7868/S0002333716030091.
4. Трифонов В.Г., Соколов С.Ю. // Вестник Российской Академии. Т. 88. № 1. 2018. С. 33–39. DOI: 10.7868/S0869587318010048.
5. Санина И.А., Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М. и др. // Физика Земли. 2019. № 2. С. 156–167. DOI: 10.31857/S0002-333720192156-167.
6. Уломов В.И., Богданов М.И. Новый комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-2012) // Инженерные изыскания. 2013. № 8. С. 30–39. ID: 20295688.

SEISMOGENIC ANCIENT STRUCTURES OF THE CENTRAL AND NORTHERN PART OF THE EAST EUROPEAN PLATFORM

Academician of the RAS V. V. Adushkin¹, I. A. Sanina¹, G. N. Ivanchenko¹,
E. M. Gorbunova¹, I. P. Gabsatarova², N. L. Konstantinovskaya¹, M. A. Nesterkina¹

¹*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

²*Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Obninsk,
Kaluzhsky Region, Russian Federation*

Received June 26, 2019

The analysis of the location of the epicenters of earthquakes that occurred in the central and northern part of the East European platform in 2009–2016, recorded by the seismic stations of the GS RAS and the small aperture seismic array of IGD RAS “Mikhnevo” was performed. The results obtained indirectly indicate the seismic activity of the Riphean structures of the region, disturbing the surface of the basement, and their possible activation at the present time. Available data on historical earthquakes also confirm their relevance to paleorifts. It seems important to take into account the position of the ancient aulacogens in assessing the seismic hazard of the East European platform.

Keywords: epicenters of earthquakes, aulacogens, seismic activity, seismic danger.