Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.374:621.314.632:621.382.2/.3

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.046-054

Геофизический генератор импульсных напряжений для сейсмоэлектрической разведки недр

© 2021 И. П. Дудченко*, Д. В. Костылев, С. А. Гуляков, Н. С. Стовбун

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: ilpadu@mail.ru

Резюме. В статье описываются процесс и результат разработки, а также испытаний экономически эффективного, переносного, безопасного для перевозки авиатранспортом геофизического генератора импульсных напряжений для сейсмоэлектрической разведки недр. Базовым элементом генератора являются быстродействующие силовые электронные ключи нового поколения – биполярный транзистор с изолированным затвором или полевой транзистор на основе карбида кремния и компактный силовой преобразователь переменного напряжения автономного генератора или электрической сети в постоянное напряжение, использующий широтно-импульсную модуляцию и стабилизацию тока или напряжения в зависимости от режима, заданного исследователем. Пригодность разработанной конструкции генератора и правильность выбора параметров его элементов подтвердились в ходе испытаний в полевых условиях, где был проведен детальный анализ воздействия геофизического генератора на параметры геосреды.

Ключевые слова: сейсморазведка, электроразведка, геофизические исследования, биполярный транзистор с изолированным затвором, полевой транзистор на основе карбида кремния, силовой преобразователь, выпрямитель, сейсмический шум, электромагнитное зондирование

A geophysical pulse voltage generator for seismic and electric exploration of the subsurface

Ilia P. Dudchenko*, Dmitry V. Kostylev, Sergey A. Gulyakov, Nikolay S. Stovbun

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: ilpadu@mail.ru

Abstract. This article describes the process and results of the development and testing of a cost-effective, portable, safe to move by air geophysical pulse voltage generator for seismic exploration of the subsurface. The generator is based on high-speed power electronic keys of a new generation consisting of an insulated gate bipolar transistor or a field-effect transistor based on silicon carbide, a compact power converter of alternating voltage from an autonomous generator or electric network to direct voltage using pulse-width modulation and current or voltage stabilization depending on the mode set by a researcher. Field tests were conducted to confirm the suitability of the developed design of the generator and the correctness of the chosen parameters of its elements. To this end, a detailed analysis of the effect of the developed geophysical generator on the parameters of the geoenvironment was carried out.

Keywords: seismic exploration, electric exploration, geophysical research, insulated gate bipolar transistor, silicon carbide field-effect transistor, power converter, rectifier, seismic noise, electromagnetic sounding

Для цитирования: Дудченко И.П., Костылев Д.В., Гуляков С.А., Стовбун Н.С. Геофизический генератор импульсных напряжений для сейсмоэлектрической разведки недр. *Геосистемы переходных зон*, 2021, 5(1), с. 46–54.

https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.046-054

For citation: Dudchenko I.P., Kostylev D.V., Gulyakov S.A., Stovbun N.S. A geophysical pulse voltage generator for seismic and electric exploration of the subsurface. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2021, 5(1), pp. 46–54. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.046-054

Введение

Одна из ключевых проблем инструментального обеспечения геофизических исследований – высокая стоимость оборудования. Но благодаря успехам современной силовой электронной техники, появлению новых компонентов, а также расширению технических возможностей разработчиков, в настоящее время появилась возможность создавать недорогие и эффективные устройства, ориентированные на узкоспециализированные исследовательские задачи, при минимальных затратах.

Постановка задачи и определение основных элементов

Для осуществления сейсмоэлектрической разведки недр [Якубовский, Ренард, 1991] требуется источник электрического воздействия на пару разнесенных друг от друга заземлителей. Основным элементом источника служит электронный ключ, в заданное время включающий и отключающий электрическое воздействие (напряжение или ток).

В Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН) более 30 лет назад был разработан и использовался источник высоковольтного (10 кВ) импульсного воздействия, который разряжал батарею высоковольтных конденсаторов с помощью так называемого игнитрона – электронной лампы, заполненной ртутью и ее парами. В настоящее время восстановление и модернизация данной установки не только нецелесообразны из-за невозможности приобрести игнитроны, но и полностью исключены из-за ограничений на использование приборов, содержащих ртуть или ее соединения.

Учитывая прогресс в части роста напряжений и токов полууправляемых полупроводниковых ключей [Воронин, 2001] – тиристоров, а также наличие большой номенклатуры их на рынке, первоначально рассматривался вопрос о применении тиристоров в качестве базового элемента. Однако тиристор подобен игнитрону в том отношении, что позволяет только включить воздействие, но не отключить его (именно поэтому тиристор и ему подобные элементы называют «полууправляемый» ключ). Следовательно, воздействие должно самопроизвольно «закончиться», что накладывает ограничения на параметры и форму электрических импульсов, которые может выдавать источник, а также на время воздействия этих импульсов.

Поэтому было принято решение использовать в качестве базового элемента один из полностью управляемых силовых ключей, которые в электронике называют транзисторами.

«Классический» биполярный транзистор управляется током, достигающим нескольких процентов от коммутируемого тока, что является значительной величиной и в результате усложняет систему гальванической изоляции цепей управления от силовой цепи, а в конечном счете делает устройство малоэффективным в плане энергопотребления, при том что снижение эффективности (КПД) означает рост тепловых потерь, требование больших площадей охлаждения и, как следствие, рост массы и габаритов устройства.

Поэтому выбор был сделан в пользу двух типов управляемых силовых ключей: полевых транзисторов – КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник - MOSFET, metal oxide semiconductor field effect transistor) на базе карбида кремния (SiC MOSFET), имеющих малое сопротивление силового канала, или практически эквивалентных им по параметрам управления, но более быстродействующих (время полного отключения тока из включенного состояния менее 200 нс) биполярных транзисторов с изолированным затвором – БТИЗ (IGBT, insulated gate bipolar transistor). Устройство разработано с условием совместимости с обоими типами транзисторов, но при выборе конкретного ключа для практического применения было решено использовать более дешевый ІGBT-транзистор, позволяющий управлять током лишь одного направления, что допустимо в запланированном эксперименте. Имеющиеся в продаже IGBTтранзисторы выпускаются на большой диапазон напряжений (до 5 кВ) и токов (до 600 А). В отличие от SiC MOSFET, силовой канал IGBT-транзистора однонаправленный, что позволяет управлять током одной полярности, как было указано в техническом задании. При необходимости управления током обеих полярностей IGBT-транзистор можно заменить на полевой транзистор типа SiC MOSFET.

Разработка генератора импульсных напряжений

Первоначальная отладка разработанных узлов генератора. Для первоначальной отладки работы узлов по отдельности был использован универсальный комплект PinBoard II (рис. 1) производства EasyElectronics (Россия) (http://easyelectronics.ru/otladochnaya-platapinboard-ii.html; [Соловьев, Морозов, 2014]). Это позволило ускорить разработку, так как данный комплект ориентирован на потребности разработчика и не только содержит в своем составе базовый набор инструментов в виде распаянных на плате электронных компонентов, но и предоставляет возможность подключать дополнительные модули (называемые «боковыми»), а также способен выполнять функции программатора. В отличие от выпускаемых фирменных отладочных комплектов



Рис. 1. Синтез узлов генератора с помощью отладочной платы PinBoard II (Россия). **Figure 1.** Synthesis of generator nodes using the PinBoard II debugging board (Russia).



Рис. 2. Источник постоянного напряжения 360 В 1500 Вт и прерыватель тока. **Figure 2.** DC 360 V 1500 W power supply and current interrupter.

мировых лидеров-производителей электронных компонентов, PinBoard II не привязан к какой-либо одной платформе и легко трансформируется под широкий круг задач.

В отличие от переменного тока, сильно подверженного поверхностному эффекту и поэтому текущему в поверхностном слое грунта, постоянный ток течет по всей толще грунта, в результате чего образуется объемное поле плотности тока, создающее значительный распределенный магнитный поток. При разрыве цепи в таких условиях возможно возникновение значительной электродвижу-

щей силы (ЭДС) самоиндукции. На практике эта ЭДС проявлялась в форме устойчивой электрической дуги при попытках разорвать цепь неавтоматическими устройствами с подвижными контактами, что подтвердило необходимость учета данного эффекта при проектировании прерывателя тока. Стандартным методом защиты силовых электронных ключей от перенапряжений при отключении цепи является применение встречно-параллельного «обратного» диода. Так как IGBT-транзисторы широко применяются для быстрой коммутации цепей со значительной индуктивностью, например в системах электропривода или сварочных преобразователях, то в подавляющем большинстве они выпускаются со встроенными обратными диодами, чем достигается безотказная работа этих ключей даже на «ультразвуковых» частотах переключения.

В результате испытаний и отладки на PinBoard II был создан прерыватель тока (рис. 2, справа) на базе IGBT-транзистора, управляемого микроконтроллером AtTiny13 (Smart Connected Secure Microchip Technology. – https://www.microchip. com/). Изначально параметры заземляющих устройств в местах проведения будущих экспериментов были неизвестны, поэтому проектирование прерывателя было произведено «с запасом» (600 В, 90 А), который впоследствии был скорректирован в меньшую сторону – до 600 В, 30А (IGBT-транзистор NGTG15N60S1EG) (ДКО Электронщик. – https://www.electronshik. ru/, дата обращения: 06.11.2020).

Первые эксперименты и уточнение параметров. В первых экспериментах, начатых в 2019 г. на Камчатке и в Москве, в качестве источника были использованы батареи из 25 последовательно соединенных свинцово-кислотных аккумуляторов, которые обеспечили постоянное напряжение около 300 В. Были выявлены существенные недостатки такого решения. Во-первых, существенная масса и невозможность авиаперевозки из-за наличия в составе аккумуляторов серной кислоты, в результате чего приобретаемые для эксперимента аккумуляторы приходилось оставлять на месте эксперимента. Во-вторых, для зарядки аккумуляторов после рабочего дня требуется или иметь 25 зарядных устройств, или потратить несколько дней на зарядку всех аккумуляторов до следующего дня проведения эксперимента. В-третьих, по мере разряда батарей их ЭДС уменьшается, а внутреннее сопротивление увеличивается, что приводит к изменению параметров импульса в ходе эксперимента.

Поэтому летом 2020 г. прерыватель тока был дополнен источником стабилизированного постоянного напряжения 360 В с номинальным током 4.2 А, что соответствует мощности 1500 Вт. Основой модуля служит микросхема PF1000А-360 фирмы TDK-Lambda Americas (PF-1000A: Detailedinformation: Industrial/medicalpowersupplies|TDK-Lambhttps://product.tdk.com/en/ daAmericas. search/power/switching-power/ac-dc-converter/ info?part no=PF1000А-360, дата обращения: 25.11.20) размерами 146 × 86 × 13 мм, представляющая собой широтно-импульсно модулирующий (ШИМ) преобразователь со стабилизацией напряжения при питании переменным напряжением от 85 до 265 В частотой 47-63 Гц. Была изготовлена печатная плата, на которую установили PF1000А-360 со вспомогательными элементами. Плату встроили в корпус типа mini-ITX (рис. 2, слева), в который также поместили дополнительный источник питания 12 В, амперметр и принудительное охлаждение.

При испытании в пос. Петропавловское Анивского района в октябре 2020 г. был сделан заземлитель из оцинкованных труб. Грунт в районе испытаний был сильно увлажнен, и поэтому предполагалось, что ток заземлителей будет иметь значительную величину, максимально возможную для данной конструкции заземлителя. Во время полевых испытаний было зафиксировано превышение тока заземлителя над номинальным током источника на 33 %. Благодаря активному охлаждению источник исправно отработал в повторно-кратковременном режиме (5 с – импульс тока, 15 с – пауза, а также 10 с – импульс, 20 с – пауза) сериями по 100 импульсов, при этом температурный режим источника остался в пределах номинального режима.

Оценка воздействия работы генератора на геофизические параметры

Испытания 29 октября 2020 г. в пос. Петропавловское Анивского района проводились на комплексном геофизическом полигоне ИМГиГ ДВО РАН, оснащенном аппаратурой регистрации сейсмического и сейсмоакустического шума (молекулярно-электронный широкополосный сейсмометр СМЕ-6111 и молекулярно-электронный гидрофон [Kostylev et al., 2019; Костылев, 2020]) и многоэлектродной системой геоэлектрических измерений [Lyubushin et al., 2016]. Общая схема оснащения полигона приведена на рис. 3.

Расположение электродов генератора относительно оборудования геофизического полигона и автомобильной дороги Южно-Сахалинск – Холмск, с указанием реперной точки с координатами, приведено на рис. 4.

Воздействие работы генератора на геофизические параметры оценивали прежде всего по записям сейсмического шума молекулярно-электронных приборов, а также по результатам анализа измерений многоэлектродной системы. Многоэлектродная система геоэлектрических измерений представляет собой вертикальную систему из 4 горизонтально расположенных компактных электродов, закопанных на небольшой глубине в грунт. Пункт подземно-электрических измерений имеет 3 измерительных шурфа, расположенных под углом 45° к магнитному меридиану: северовосточный (СВ), центральный (Ц) и юго-западный (ЮЗ). Шурфы располагаются на расстоянии 5 м друг от друга. Каждый шурф имеет



Рис. 3. Оснащение комплексного геофизического полигона «Петропавловское». **Figure 3.** Equipment of the complex geophysical polygon "Petropavlovsk".



Рис. 4. Карта места проведения эксперимента 29 октября 2020 г. **Figure 4.** Map of the site of the experiment on October 29, 2020.

глубину 3 м. Измеряемой величиной является разность потенциалов между электродами в каждом шурфе (электрод-электродная схема), между электродами в различных шурфах (субгоризонтальная схема), между каждым электродом и локальным заземлением (схема с общей землей). Использование данной аппаратуры при проведении эксперимента 29 октября 2020 г. позволило наглядно представить процесс проведения эксперимента и определить периоды воздействия импульсов тока на регистрацию сейсмического шума молекулярно-электронными измерительными приборами пункта наблюдений (рис. 5). Результаты, представленные на рис. 5, показывают, что фактически каждому этапу эксперимента соответствует в записях молекулярно-электронных приборов отклик в уровне регистрируемого сейсмического шума на результат воздействия генерации импульсов напряжения и возбуждения тока во внешнем слое земной коры. Кроме того, был проведен анализ четырех периодов продолжительностью по 24 ч – двое суток до начала эксперимента, сутки в день проведения эксперимента и сутки в день, следующий за днем проведения эксперимента. Результаты анализа представлены на рис. 6. В процессе анализа для записей сейсмического шума сейсмометром СМЕ-6111 были построены огибающие сигнала сейсмического шума, очищенные от откликов записей прибора на сейсмические воздействия. Рисунок наглядно показывает для дней, предшествующих эксперименту (27–28 октября), явно выраженный суточный характер изменения уровня сейсмического шума – значительное уменьшение его уровня в ночные периоды (по сахалинскому времени) и увеличение во время дневной активности. Совершенно иной характер отмечается 29 октября (время начала записи шума 29 октября на рисунке соответствует времени начала эксперимента). Традиционного ночного затишья в уровне шума 29 октября не наблюдается – напротив, отмечается сигнал акселерационного типа (плавное нарастание колебаний). Указанная тенденция сохраняется в течение 22–23 ч после окончания эксперимента. Следующие сутки после проведения эксперимента (30 октября) характеризуются сигналом релаксационного типа, и уровень сейсмического шума возвращается к обычным



Рис. 5. Огибающая сигналов сейсмического шума молекулярно-электронных приборов (вверху) и изменение разности потенциалов на каналах измерений между электродами северо-восточного (CB) шурфа системы геоэлектрических измерений (внизу) в период проведения эксперимента (время UTC). Этапы проведения эксперимента: (A) – проверка оборудования; (Б) – первая серия импульсов. Полярность: электрод 1 (–), электрод 2 (+). Импульс 5 с, пауза 15 с. Количество импульсов – 100. Значение тока – 5.2 А в начале серии, 4.95 А – в конце; (B) – окончание первой серии импульсов; (Γ) – планируемое начало второй серии импульсов (первый тест). Полярность: электрод 1 (+), электрод 2 (–). Импульс не более 1 с (выход из строя входного предохранителя); (Д) – планируемое начало второй серии импульсов (второй тест). Полярность: электрод 1 (+), электрод 2 (–). Импульс не более 5 с (перегрузка генератора 2 кВт); (Е) – вторая серия импульсов. Полярность: электрод 1 (–), электрод 2 (+). Импульс 10 с, пауза 20 с. Количество импульсов – 100. Значение тока – от 5.2 до 5.4 А; (Ж) – окончание второй серии импульсов.

Figure 5. The envelope of the seismic noise signals of molecular electronic devices (top) and the change in the potential difference on the measurement channels between the electrodes of the north-eastern (NE) pit of the geoelectric measurement system (bottom) during the experiment (UTC time). The stages of the experiment: (A) – equipment checking; (B) – first pulse train. Polarity: electrode 1 (–), electrode 2 (+). Pulse – 5 s, pause – 15 s. Number of pulses is 100. Current meaning is 5.2 A at the train beginning, and 4.95 A – at the end; (B) – the end of first pulse train; (Γ) – planned start of second pulse train (first test). Polarity: electrode 1 (+), electrode 2 (–). Pulse is not more than 1 s (failure of the input fuse); (\mathcal{I}) – planned start of second pulse train (second test). Polarity: electrode 1 (+), electrode 2 (–). Pulse is not more than 5 s (the generator overload 2 kW); (E) – second pulse train. Polarity: electrode 1 (–), electrode 2 (+). Pulse – 10 s, pause – 20 s. Number of pulses is 100. Current meaning is from 5.2 A to 5.4 A; (\mathcal{K}) – end of second pulse train.



Рис. 6. Сейсмический шум, зарегистрированный молекулярно-электронным сейсмометром СМЕ-6111 до и после проведения эксперимента.

Figure 6. Seismic noise recorded by the molecular-electronic seismometer CME-6111 before and after the experiment.

значениям приблизительно через 42 ч после окончания эксперимента. Подобные результаты не противоречат данным, полученным в работе [Закупин и др., 2014], где отмечалось, что амплитуда сигналов после электромагнитного воздействия на геосреду превышала среднеквадратичный уровень шума более чем в 3 раза.

Окончательный вариант генератора

С учетом вышеописанных результатов были уточнены требования к генератору, усовершенствован алгоритм его работы, разработано и изготовлено новое устройство прерывателя тока, показанное на рис. 7.

В качестве источника постоянного напряжения был выбран модуль выпрямителя CSP-3000-400. Модуль поддерживает как режим стабилизации напряжения в диапазоне от 60 до 400 В, так и режим стабилизации тока в диапазоне от 0.6 до 7.5 А. Постоянное стабилизированное напряжение от 60 до 400 В с внешним управлением либо путем изменения напряжения на управляющем входе, либо с помощью ШИМ-сигнала частотой 500-1000 Гц. Испытания прерывателя с модулем выпрямителя CSP-3000-400 в условиях лаборатории ИМГиГ ДВО РАН в ноябре 2020 г. подтвердили правильность выбора устройства. Дальнейшие полевые испытания окончательного варианта устройства были временно прекращены в связи с наступлением зимы.

Структурная схема геофизического генератора импульсных напряжений для сейсмоэлектрической разведки недр приведена на рис. 8. На схеме серыми границами выделены части генератора, гальванически изолированные друг от друга. Управляющим устройством генератора служит микроконтроллер AtMega8 (Smart Connected Secure Microchip Technology. – https://www.microchip.com/, дата обращения: 20.11.2020), ресурсов которого хватает для выполнения функции микропро-



Рис. 7. Усовершенствованный прерыватель тока. **Figure 7.** Advanced current interrupter.



Рис. 8. Структурная схема геофизического генератора импульсных напряжений для сейсмоэлектрической разведки недр.

Figure 8. Block diagram of the geophysical pulse voltage generator for seismic and electric exploration of the subsurface.

цессорной системы управления прерывателем тока (автоматическая отработка эксперимента по заданным параметрам, работа с клавиатурой, жидкокристаллическим индикатором и SD-картой). Справа сверху на рис. 8 изображена питающая сеть 230 В, которая относится к классу 0.4 кВ с глухо заземленной нейтралью, а поэтому должна быть гальванически изолирована от выходной цепи источника постоянного напряжения. Для управления прерывателем тока со стороны микроконтроллера имеется оптоэлектронное устройство гальванической развязки, встроенное в модуль самого прерывателя. Для питания низковольтной части прерывателя тока и оптоэлектронного устройства гальванической развязки применен встроенный вспомогательный источник, входящий в состав CSP-3000.

Разработанный генератор можно перевозить любым транспортом. Масса всех элементов генератора без учета элементов заземлителя и питающей линии составляет не более 5 кг. Диапазон напряжений питания – 180–264 В переменного напряжения частотой 47–63 Гц либо 254–370 В постоянного напряжения. Потребляемый из сети ток равен 16 А при напряжении сети переменного тока 230 В. Применение быстродействующего IGBT-ключа

в модуле прерывателя тока создает возможность совершенствовать генератор без изменения его схемы, в том числе – генерировать импульсы напряжения не только заданной длительности, но и заданной формы. Стоимость модулей и комплектующих, на которых собран генератор, укладывается в бюджетную схему, а все работы по его сборке и наладке были произведены силами отдела исследований геофизических полей и физических свойств геоматериалов с использованием инструментов и оборудования Центра коллективного пользования «Комплексные исследования природных и техногенных систем» ИМГиГ ДВО РАН.

Выводы

1. Проведено исследование пригодности мощных электронных

ключей для генерации импульсов напряжения и возбуждения тока во внешнем слое земной коры.

2. Учтены фактические зависимости величины постоянного тока заземлителя от приложенного напряжения и заглубления заземлителя.

3. Спроектирован и собран силами ИМГиГ ДВО РАН геофизический генератор импульсных напряжений для сейсмоэлектрической разведки недр.

4. Применение быстродействующих силовых электронных ключей в качестве базового элемента генератора делает возможной генерацию импульсов заранее заданной произвольной формы с помощью широтно-импульсной модуляции.

5. Стоимость компонентов и простота конструкции генератора позволяют легко воспроизводить его в любой исследовательской или иной заинтересованной организации при условии передачи программного обеспечения аппаратного уровня устройства.

6. Апробация прибора в условиях полевого эксперимента показала очевидное влияние воздействия прибора на геосреду, что было подтверждено анализом результатов записей сейсмического и сейсмоакустического шума на комплексном геофизическом полигоне ИМГиГ ДВО РАН.

Список литературы

1. Воронин П.А. 2001. Силовые полупроводниковые ключи. Семейства, характеристики, применение. М.: Додэка-XXI, 384 с.

2. Закупин А.С., Богомолов Л.М., Мубассарова В.А., Ильичев П.В. 2014. Сейсмоакустические проявления воздействий мощных импульсов тока по данным скважинных измерений на Бишкекском геодинамическом полигоне. Физика Земли, (5): 105-120.

3. Костылев Д.В., Богинская Н.В. 2020. Сейсмоакустические наблюдения с применением молекулярно-электронных гидрофонов на Сахалине и южных Курильских островах (о. Кунашир). Геосистемы переходных зон, 4(4): 486-499. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.486-499.

4. Соловьев Р.И., Морозов А.С. 2014. Обзор отладочного комплекса PINBOARD 2 и его практическое применение для разработки устройств на микроконтроллерах Atmel и ARM. В кн.: Современная наука глазами молодых ученых: достижения, проблемы, перспективы: материалы межвузовской науч-практ. конф. Рязань: Рязанский гос. агротехн. ун-т им. П.А. Костычева, с. 98–101.

5. Якубовский Ю.В., Ренард И.В. 1991. Электроразведка. М.: Недра, 359 с.

6. Kostylev D.V., Bogomolov L.M., Boginskava N.V. 2019. About seismic observations on Sakhalin with the use of molecular-electronic seismic sensors of new type. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 324(012009). https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012009

7. Lyubushin A.A., Bobrovskiy V.S., Shopin S.A. 2016. Experience of complexation of global geophysical observations. Geodynamics & Tectonophysics, 7(1): 191-195.

References

1. Voronin P.A. 2001. [Power semiconductor keys. Families, characteristics, and applications]. Moscow: Dodeka-XXI, 384 p. (In Russ.).

2. Zakupin A.S., Mubassarova V.A., Il'ichev P.V., Bogomolov L.M. 2014. Seismoacoustic responses to highpower electric pulses from well logging data at the Bishkek geodynamical test area. Izvestiva. Physics of the Solid Earth, 50(5): 692–706. https://doi.org/10.1134/s1069351314040193

3. Kostylev D.V., Boginskaya N.V. 2020. Seismoacoustic observations using molecular-electronic hydrophones on Sakhalin and the South Kuril Islands (Kunashir Island). Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones, 4(4): 486-499. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.486-499

4. Solovyov R.I., Morozov A.S. 2014. Overview of the PINBOARD 2 debugging complex and its practical application for developing devices on Atmel and ARM microcontrollers. In: Modern science through the eyes of young scientists: achievements, problems, prospects: Materials of the Interuniversity scientific and practical conf. Ryazan: Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, p. 98-101. (In Russ.).

5. Yakubovskiy Yu.V., Renard I.V. 1991. [Electrical exploration]. Moscow: Nedra, 359 p. (In Russ.).

6. Kostylev D.V., Bogomolov L.M., Boginskaya N.V. 2019. About seismic observations on Sakhalin with the use of molecular-electronic seismic sensors of new type. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 324(012009). https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012009

7. Lyubushin A.A., Bobrovskiy V.S., Shopin S.A. 2016. Experience of complexation of global geophysical observations. Geodynamics & Tectonophysics, 7(1): 191-195.

Об авторах

ДУДЧЕНКО Илья Павлович (ORCID 0000-0002-4967-7405), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, руководитель отдела исследования геофизических полей и физических свойств геоматериалов ЦКП «Комплексные исследования природных и техногенных систем», Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск, ilpadu@mail.ru

КОСТЫЛЕВ Дмитрий Викторович (ORCID 0000-0002-8150-9575), младший научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, d.kostylev@imgg.ru

ГУЛЯКОВ Сергей Александрович, инженер-исследователь ЦКП «Комплексные исследования природных и техногенных систем», Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, gulyakov 97@mail.ru

СТОВБУН Николай Сергеевич, инженер-исследователь ЦКП «Комплексные исследования природных и техногенных систем», Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, nikolay19972016@gmail.com

About the Authors

DUDCHENKO Ilia Pavlovich (ORCID 0000-0002-4967-7405), Cand. of Engineering, Senior Researcher at the Center for Collective Use, Head of the Department of research of geophysical fields and physical properties of geomaterials, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, ilpadu@mail.ru

KOSTYLEV Dmitry Viktorovich (ORCID 0000-0002-8150-9575). Junior Researcher at the Laboratory of seismology, Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, d.kostylev@imgg.ru

GULYAKOV Sergey Aleksandrovich, Research Engineer at the Center for Collective Use, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, gulyakov 97@mail.ru

STOVBUN Nikolay Sergeevich, Research Engineer at the Center for Collective Use, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk,

nikolay19972016@gmail.com