

*Н. О. Кожевников*¹✉

Электроразведочные исследования в устье реки Сармы (Приольхонье, Западное Прибайкалье)

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В статье представлены и обсуждаются результаты работ методами зондирования становлением поля, ВЭЗ и электропрофилеирования в устье реки Сармы. Большая часть площади работ находится в пределах конуса выноса, в наземной части дельты. Как показали электроразведочные исследования, геоэлектрический разрез здесь включает СЗ и ЮВ тектонические блоки. СЗ блок, примыкающий к уступу Приморского сброса, сложен метаморфическими породами с удельным электрическим сопротивлением порядка 103 Ом·м. В ЮВ блоке выделены полого залегающие границы, разделяющие слои, удельное сопротивление которых уменьшается с глубиной от 103 до единиц Ом·м. Предположительно, верхний слой мощностью около двухсот метров сложен осадками конуса выноса. Низкое удельное сопротивление пород на глубине свыше 750 м указывает на их принадлежность к Чернорудской зоне и объясняется присутствием в них графита, образующего электрически-связанные протяженные системы.

Ключевые слова: Приольхонье, река Сарма, Приморский сброс, конус выноса, геоэлектрическая модель

*N. O. Kozhevnikov*¹✉

Electrical and electromagnetic surveys at the mouth of the Sarma River (Olkhon region, Western Gisbaikalia)

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Abstract. The article presents and discusses results of the transient electromagnetic sounding, VES and electrical profiling methods at the mouth of the Sarma River. Most of the survey area is located within the alluvial fan, on the terrestrial part of the delta. According to the survey results, the geoelectric section here includes NW and SE tectonic blocks. The NW block, adjacent to the Primorsky fault scarp, consists of metamorphic rocks with resistivity of about 103 ohm·m. In the SE block, gently sloping boundaries are identified, separating layers with resistivity decreasing with depth from a thousand to less than ten ohm·m. Presumably, the upper layer with a thickness of about two hundred meters is composed of the alluvial fan sediments. Low resistivity of rocks at a depth exceeding 750 m, indicating that they belong to the Chernorud zone, is due to graphite forming an extended, electrically connected network.

Keywords: Olkhon region, Sarma River, Primorsky fault, alluvial fan, geoelectric model

Введение

Современные представления о геологии Приольхонья основываются на результатах наземного геологического картирования и дистанционных съемок [8].

Однако при изучении структуры Приольхонья возможности таких съемок, особенно, при экстраполяции их результатов на глубину, ограничены. В связи с этим привлекают внимание геофизические методы, позволяющие осуществлять объемное геологическое картирование. В 1979–2010 гг. в Приольхонье в рамках НИР и учебных геофизических практик, которые здесь проходили студенты геологических специальностей ИрНИТУ, проводились съемки методами вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), симметричного электропрофилирования (СП), естественного электрического поля (ЕП), сверхдлинноволнового электропрофилирования (СДВР) и зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). Основной объем исследований выполнен методами ЗСБ и ЕП в центральном Приольхонье [4]. В настоящей статье представлены не публиковавшиеся ранее результаты электроразведочных исследований в устье реки Сармы.

Методика и результаты электроразведочных съемок

Участок работ находится в Приольхонье, в устье реки Сармы (рис. 1а). Съемки проводились вблизи уступа Приморского сброса и в дельте реки, в пределах конуса выноса. Комплекс методов включал ЗСБ, ВЭЗ и СП. На рис. 1б приведена схема, где показаны установки ЗСБ, точки ВЭЗ и профиль СП.

Работы методом ЗСБ включали два этапа. В 1990 и 1992 гг. были выполнены 8 зондирований симметричной установкой «петля в петле» 200×50 м. Для возбуждения и регистрации переходных процессов использовалась разработанная автором аппаратура [2]. В 2006 г. выполнено зондирование с мощным источником: использовалась генераторная петля размером 400×400 м, ток в которой составлял около 100 А. Приемные петли размером 18×18 м располагались на линиях, ориентированных по простиранию (50, 48, 45, 49, 51) и вкрест простирания (43, 44, 45, 46, 47) уступа Приморского сброса. Одна из приемных петель размещалась в центре генераторной, остальные – на расстоянии 400 м и 750 м от центра. Для измерения индукционных переходных процессов применялась цифровая многоканальная аппаратура SGS-TEM [9].

Съемки методами ВЭЗ и двухразносного профилирования проводились для оценки параметров верхней части геоэлектрического разреза. Центры установок ВЭЗ находились рядом с генераторными петлями 90-01 и 90-02 метода ЗСБ (рис. 1б). Направление размотки линий АВ и MN показано стрелками на рис. 1б. Максимальный разнос между питающими электродами составлял 500 м. Симметричное профилирование выполнено с питающими линиями 20 м и 100 м вдоль профиля, ориентированного по простиранию уступа Приморского разлома.

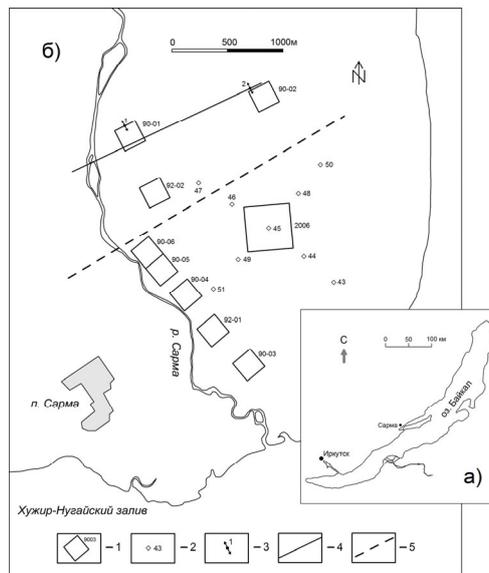


Рис. 1. Озеро Байкал (а) и схема электроразведочных работ в устье реки Сармы (б): 1 – генераторная петля, год и номер зондирования; 2 – приемная петля размером 18м x 18м и ее номер; 3 – точка ВЭЗ, ее номер и направление размотки линий; 4 – профиль СЭП; 5 – граница между СЗ и ЮВ блоками.

На рис. 2 приведены полевые кривые кажущегося удельного сопротивления ρ_k (ВЭЗ) и ρ_τ (ЗСБ); кривые ρ_τ измерены симметричными установками «петля в петле». Кривые ρ_k и ρ_τ согласованы по уровню; так горизонтальная ось кривых ВЭЗ с отметкой $\rho_k = 10^3$ Ом·м совмещена с горизонтальной осью кривых $\rho_\tau = 10^3$ Ом·м. По горизонтали кривые расположены таким образом, что левые ветви кривых ρ_τ являются «продолжением» правых ветвей кривых ρ_k метода ВЭЗ.

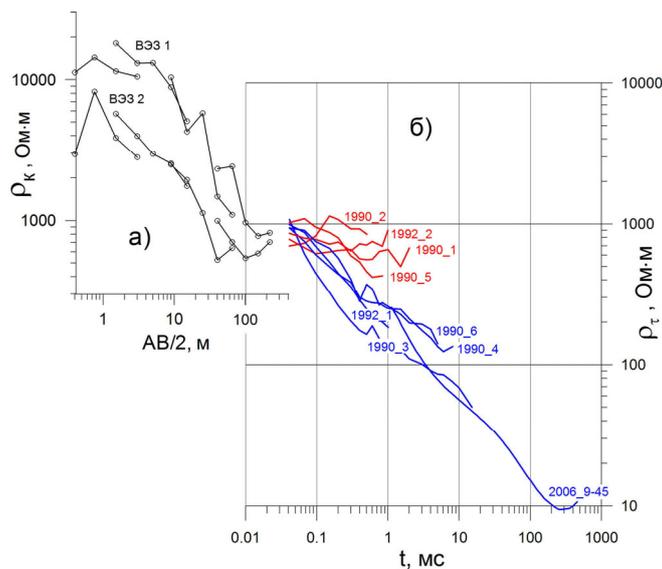


Рис. 2. Полевые кривые ρ_k метода ВЭЗ (а) и ρ_τ метода ЗСБ (б)

Кривые ρ_{τ} образуют две группы. Вблизи уступа Приморского сброса кажущееся удельное сопротивление практически не изменяется с увеличением временной задержки, оставаясь в интервале от нескольких сотен Ом·м до тысячи Ом·м. Соответствующие кривые ρ_{τ} показаны на рис. 2 красным цветом. Для остальных кривых ρ_{τ} , выделенных синим цветом, характерно неуклонное убывание кажущегося удельного сопротивления со временем. С учетом данных ВЭЗ кажущееся удельное сопротивление убывает от 104 до 10 Ом·м.

На рис. 3 приведены все кривые кажущегося удельного сопротивления, полученные в результате зондирований с мощным источником (см. рис. 1б). Как видно на рис. 3а, при ориентации линии разномов вкрест простирания уступа Приморского сброса кривые ρ_{τ} изменяются в зависимости от положения приемной петли. Сильнее всего это проявляется на ранних временах, при этом среди кривых ρ_{τ} выделяется измеренная приемной петлей 09-47, которая располагалась вблизи уступа Приморского сброса (см. рис. 1б). На поздних временах различие между кривыми уменьшается; это указывает на то, что по мере увеличения глубины геоэлектрическое строение исследуемого участка земной коры становится более однородным и/или изотропным.

В целом кривые ρ_{τ} на рис. 3 (за исключением измеренной приемной петлей 09-47) отличаются незначительно. Это означает, что удельное электрическое сопротивление на большей части исследуемой площади изменяется преимущественно по вертикали. Данный факт послужил обоснованием для инверсии кривых ρ_{τ} на основе горизонтально-слоистой модели.

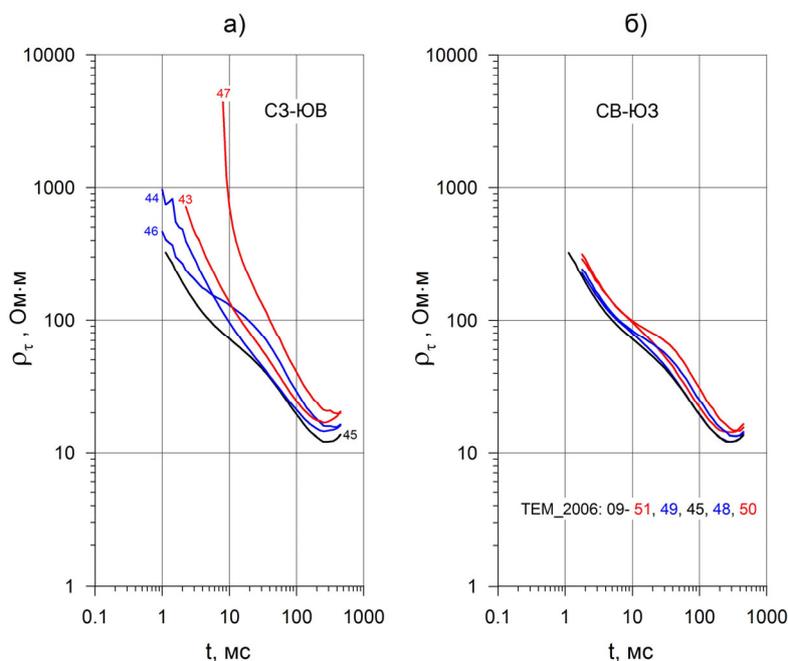


Рис 3. Кривые ρ_{τ} , измеренные с мощным источником в дельте реки Сармы. Приемные петли располагались на линии, ориентированной в направлении СЗ-ЮВ (а) и СВ-ЮЗ (б). Черным цветом показана кривая ρ_{τ} для соосной установки, синим – кривые ρ_{τ} на разноме 400 м, красным – 750 м.

На рис. 4а показаны полевая и модельная кривые ρ_{τ} для соосной установки с генераторной петлей 200×200м, а на рис. 4б – 400×400м. Результаты инверсии для всех кривых ρ_{τ} , измеренных соосными установками, приведены на рис. 4в.

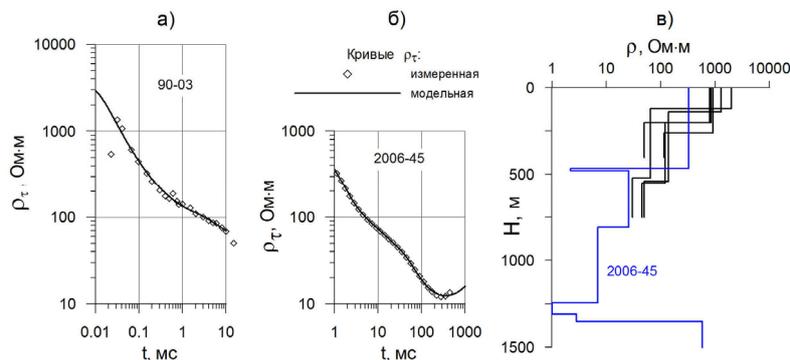


Рис. 4. Примеры, иллюстрирующие измеренные и модельные кривые ρ_{τ} (а, б) и результат инверсии для всей совокупности кривых ρ_{τ} (в)

Геоэлектрический разрез, построенный по результатам интерпретации ЗСБ с генераторными петлями размером 200×200м (рис. 5), включает северо-западный и юго-восточный блоки. Северо-западный блок, однородный по геоэлектрическому строению, образован породами с удельным электрическим сопротивлением около 10^3 Ом·м. В юго-восточном блоке прослеживаются пологозалегающие геоэлектрические слои, или горизонты, сопротивление которых понижается от одной-двух тысяч Ом·м в верхнем слое до 30–50 Ом·м в нижнем. Согласно результатам зондирования с генераторной петлей 400×400 м (см. рис. 4в) на глубине свыше 750 м, удельное сопротивление понижается до единиц Ом·м. Как уже отмечалось, при выполнении зондирований с генераторной петлей 400×400м кривая ρ_{τ} , измеренная приемной петлей 09-47, резко отличается от остальных (см. рис. 3а). Этот факт учитывался при проведении границы между ЮВ и СЗ блоками (см. рис. 1).

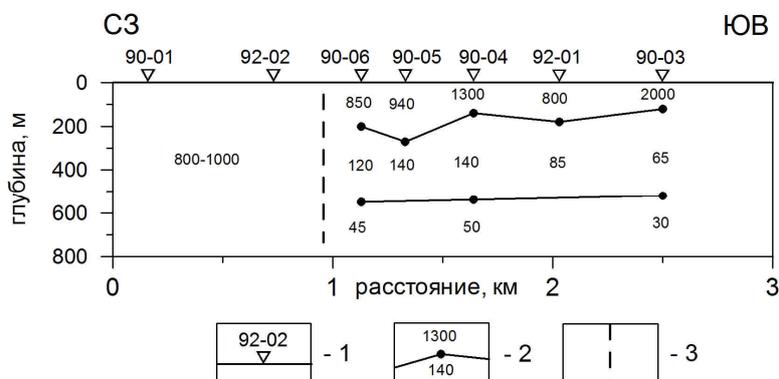


Рис. 5. Геоэлектрический разрез по данным ЗСБ с генераторными петлями размером 200м х 200м: 1 – центр установки ЗСБ и ее номер; 2 – геоэлектрическая граница и удельное сопротивление, Ом·м; 3 – граница между СЗ и ЮВ тектоническими блоками.

Интерпретация кривых ρ_k ВЭЗ (рис. 6а) дает следующие параметры верхней части геоэлектрического разреза: $\rho_1 = (3.2 \cdot 10^3 - 10^4)$ Ом·м, $h_1 = (8 - 10)$ м, $\rho_2 = (600 - 800)$ Ом·м. Рис. 6б иллюстрирует результаты двухразносного симметричного профилирования. На малом (20 м) разnose кажущееся удельное сопротивление ρ_k примерно на порядок больше, чем на большом (100 м). Изрезанность графиков профилирования и кривые ВЭЗ свидетельствуют о влиянии на результаты съемок приповерхностных неоднородностей. Вместе с тем данные ВЭЗ и СП показывают, что в региональном плане, или «в целом», верхняя часть геоэлектрического разреза на участке, где располагались точки ВЭЗ и профиль СП соответствует двухслойной модели с относительно проводящим основанием. Удельное электрическое сопротивление верхнего слоя составляет $(5 - 10) \times 10^3$ Ом·м, основания – около 10^3 Ом·м.

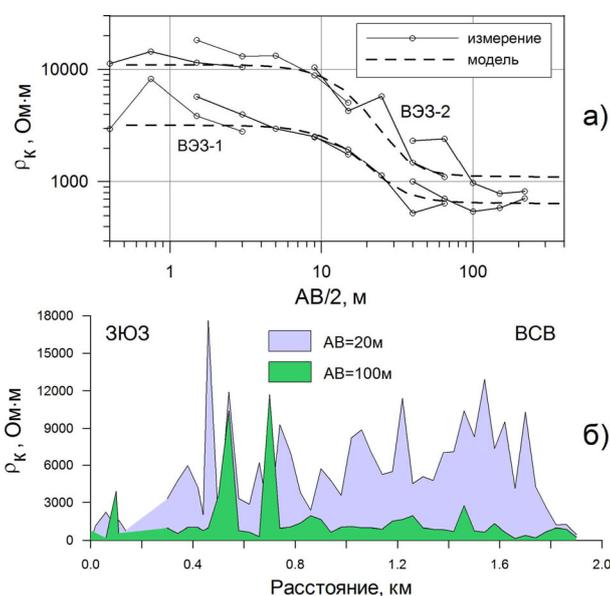


Рис. 6. Кривые ВЭЗ (а) и графики двухразносного симметричного электропрофилеирования (б)

Обсуждение результатов

Приведенные результаты электроразведочных исследований представляют собой: 1) экспериментальные данные, т.е. *объективные факты*; 2) интерпретацию фактов, которая является заведомо *дискуссионной*.

В публикациях, в которых рассматриваются вопросы геологии участка в устье р. Сармы, приводятся результаты геологических и геофизических съемок, проводившихся с целью изучения приповерхностных проявлений современной тектоники в зоне влияния Приморского разлома [3, 6, 7]. С учетом этих публикаций, а также собственных наблюдений представляется обоснованным следующий вариант геологической интерпретации данных ВЭЗ и СП. Верхний слой с удельным сопротивлением $(5 \times 10^3 - 10^4)$ Ом·м и толщиной (8–10) м сложен маловлажными крупно-глыбовыми отложениями с гравийно-галечным наполнителем. Удельное сопротивление подстилающего основания составляет (600–800)

Ом·м, т.е. совпадает с удельным сопротивлением СЗ блока по данным ЗСБ (см. рис. 4, 5). Поскольку тонкий высокоомный слой не проявляется в индукционных переходных характеристиках, логично предположить, что основание, которое «видит» метод ВЭЗ, сложено теми же породами, из которых по данным ЗСБ состоит СЗ блок.

Дефицит априорной информации о строении дельты и подстилающих ее коренных породах затрудняет геологическую интерпретацию данных ЗСБ, особенно с учетом того факта, что участок работ находится в зоне влияния Приморского и Сарминского разломов. Тем не менее, некоторые соображения по поводу геологической интерпретации могут быть высказаны уже на данной стадии изученности.

Так, граница между СЗ и ЮВ блоками на рис. 5, скорее всего, является тектонической. С учетом материалов работы [1] можно предположить, что ЮВ блок сформировался за короткий промежуток времени (в геологическом масштабе) в результате или, точнее, процессе сброса, амплитуда которого составляет сотни метров. По-видимому, верхний слой толщиной около 200 м (см. рис. 5) сложен неконсолидированными отложениями дельты. Однако, в таком случае остается невыясненным, с чем связано их высокое, порядка 10^3 Ом·м, удельное электрическое сопротивление.

Если принять, что верхний слой сложен рыхлыми осадками дельты, то скорее всего расположенный ниже слой с удельным сопротивлением около 10^2 Ом·м и подстилающее его основание с сопротивлением десятки Ом·м (см. рис. 5) образованы породами ольхонского метаморфического комплекса.

Как показали работы методом ЗСБ с мощным источником, на глубине свыше 750 м удельное электрическое сопротивление снижается до значений, не превышающих десяти Ом·м (см. рис. 4в). В этой связи привлекает внимание Чернорудская, или Чернорудско-Баракчинская тектоническая зона (ЧБТЗ). Она представлена узкой (до 5 км) и протяженной (более 50 км) структурой северо-восточного простирания, прослеживающейся в северо-западной части Приольхонья в метаморфическом комплексе ольхонской серии, рядом с границей краевого выступа фундамента Сибирской платформы [5]. Согласно результатам региональных съемок методом ЗСБ, Чернорудская зона включает породы низкого (от долей единицы до первых десятков Ом·м) удельного сопротивления, кровля которых залегает на глубине от 100 до 400 м. Причиной высокой электропроводности этих пород является присутствие в них графита, образующего протяженные электрически-связанные системы. Поскольку участок работ в устье р. Сармы находится в пределах Чернорудской зоны [5], логично предположить, что залегающие здесь на больших глубинах проводники идентичны обнаруженным в ней ранее в других местах. По-видимому, содержащие графит проводники, когда-то залегавшие на меньшей глубине, в результате сброса переместились вниз на несколько сотен метров.

Заключение

Электроразведочные исследования в устье р. Сармы дают первое представление о геоэлектрической модели участка работ в интервале глубин от единиц

метров до километра. Их результаты могут оказаться полезными в качестве основы для проектирования будущих работ по изучению геоэлектрического разреза и геологического строения этого участка Приольхонья.

Возможно, наиболее важным результатом проведенных исследований являются вопросы, возникающие при геологической интерпретации электроразведочных данных. Для ответа на них необходима постановка специально спланированные масштабных работ комплексом геофизических методов.

С позиций сегодняшнего дня представленные в статье материалы являются уникальными: работы проводились в то время, когда в устье р. Сармы еще не началась интенсивная застройка и не была проложена высоковольтная ЛЭП.

Благодарности

Автор признателен Ю.А. Агафонову за организацию и проведение зондирований становлением поля с мощным источником.

Представленные в статье результаты получены при поддержке программы фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022-0024.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вахромеев Г.С., Дмитриев А.Г., Канайкин В.С., Кожевников Н.О. Физические свойства горных пород Приольхонья // Геофизика на пороге третьего тысячелетия. Труды первой Байкальской молодежной школы-семинара. – Иркутск: ИрГТУ, 1999. – С. 110-127.
2. Вахромеев Г.С., Кожевников Н.О. Методика нестационарных электромагнитных зондирований в рудной электроразведке. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1988. – 224 с.
3. Денисенко И.А., Лунина О.В. Позднечетвертичные смещения вдоль Сарминского участка Приморского разлома по данным георадиолокации (Байкальский рифт) // *Geodynamics and Tectonophysics*. – 2020. – Vol. 11. – № 3. – С. 548-565.
4. Кожевников Н.О., Бигалке Ю., Кожевников О.К. Региональная структура Приольхонья по данным геоэлектрических исследований // *Геология и геофизика*. – 2004. – Т.45. – № 2. – С. 253-265.
5. Летников Ф.А., Савельева В.Б., Заири Н.М. Эндогенные процессы и графитовая минерализация в Чернорудско-Баракчинской тектонической зоне (Западное Прибайкалье) // *Геология и геофизика*. – 1997. – Т. 38. – № 3. – С. 661-666.
6. Лунина О.В., Гладков А.С., Черемных А.В. Разрывная структура и трещиноватость зоны Приморского разлома // *Геология и геофизика*. – 2002. – Т.43. – № 5. – С. 446-455.
7. Павлов М.В., Ильичева Е.А. Морфогенез Сарминского и Селенгинского побережий озера Байкал // *Вестник Бурятского Государственного Университета: Биология География*. – 2017. – Вып. 4. – С. 116-127.
8. Федоровский В. С., Скляр Е. В. Ольхонский геодинамический полигон (Байкал): аэрокосмические карты высокого разрешения и геологические карты нового поколения // *Geodynamics and Tectonophysics*. – 2010. – Vol. 1. – № 4. – С. 331-418.
9. Шарлов М.В., Агафонов Ю.А., Стефаненко С.М. Современные телеметрические электроразведочные станции SGS-ТЕМ и FastSnap. Эффективность и опыт использования // *Приборы и системы разведочной геофизики*. – 2010. – Т. 31. – № 1. – С. 27-31.

© Н. О. Кожевников, 2025