

**Петрофизические и петрологические характеристики
гранитоидов павловского комплекса
(Воронежский кристаллический массив)**

©2025 В. В. Ильин¹✉, В. И. Жаворонкин¹, Е. В. Ненахова²

¹*Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, 394018, Воронеж, Российская Федерация*

²*ООО "Рок Энд Милл", Василисы Кожинной д.1,
121096, Москва, Российская Федерация*

Аннотация

Введение: изучение павловского мигматит-гранит-граносиенитового комплекса имеет ключевое значение в формировании геодинамической модели развития Лосевской шовной зоны, играющей важную роль в становлении Воронежского кристаллического массива (ВКМ). Сведения об особенностях глубинного строения, позволяющие реконструировать его эволюцию, можно получить только по результатам современного геолого-геофизического моделирования. Цель данной работы заключается в создании надежной основы для интерпретации результатов геолого-геофизического моделирования на основе комплекса взаимоувязанных данных (физические свойства, петрографическое описание, петрогеохимия).

Методика: аналитические исследования вещественного состава включали изготовление и описание шлифов (20 штук) и рентгенофлуоресцентный анализ (45 проб), который производился на приборе S8 TIGER, в центре коллективного пользования научным оборудованием ВГУ. Плотность пород изучалась методом гидростатического взвешивания с использованием весов «HIGHLAND» HCB-1502. Магнитная восприимчивость определялась каппаметром КМ-7. Измерение скорости продольных волн производилось ультразвуковым дефектоскопом УК 10ПМС.

Обсуждение результатов: гранитоиды павловского комплекса в изученной выборке представлены граносиенитами, умеренно-щелочными/щелочными гранитами, лейкогранитами и щелочными сиенитами. Гранитоиды первой фазы представлены длинным петрохимическим рядом от известково-щелочной до щелочной серии, гранитоиды второй фазы генерации – от известково-щелочной до щелочной. Плотность гранитоидов варьируется в пределах от 2.61 до 2.70 г/см³ со средним значением 2.65 г/см³, внутри подгруппы выделяются лейкограниты поздней фазы со средним значением 2.63 г/см³. Распределение магнитной восприимчивости гранитоидов ранней фазы носит бимодальный характер: экстремум с положительной асимметрией и средним значением 18×10⁻³ ед. СИ включает в себя амфибол-биотитовые гранитоиды и граносиениты; второй максимум со средним значением 45×10⁻³ ед. СИ относится к щелочным сиенитам. Лейкограниты поздней фазы генерации выделяются единственным пиком со средним значением 12×10⁻³ ед. СИ. По скорости прохождения продольных волн изученная выборка пород варьирует в пределах от 5500 до 6400 м/с. Плотность связана с содержанием оксидов железа, магния и кальция (R=0.8). Магнитная восприимчивость пород тесно коррелирует с содержанием высокозарядных элементов (R=0.7). Полученные данные сведены в таблицу.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Ильин Виталий Викторович, e-mail: vitaliy.ilin.2000@bk.ru

Заключение: тесные корреляционные связи петрофизических свойств с петрологическими характеристиками пород позволяют производить дифференциацию пород комплекса и обрамления по измеренным физическим параметрам. Это делает возможной надежную интерпретацию результатов геолого-геофизического моделирования с их последующей интеграцией в геодинамические модели рассматриваемого объекта и ВКМ в целом.

Ключевые слова: Воронежский кристаллический массив, павловский комплекс, гранитоиды, петрофизика, петрогеохимия.

Источник финансирования: Исследования выполнены за счёт средств Российского научного фонда, проект 25-27-00209.

Для цитирования: Ильин В. В., Жаворонкин В. И., Ненахова Е. В. Петрофизические и петрологические характеристики гранитоидов павловского комплекса (Воронежский кристаллический массив) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2025. № 2. С. 50–61. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/2/50–61>

Введение

Несмотря на длительную историю изучения павловского мигматит-гранит-граносиенитового комплекса [1–6 и др.], данное образование не теряет своей актуальности в качестве объекта исследования, так как является ключевым в вопросе восстановления геодинамической истории развития Лосевской шовной зоны (рис. 1) в контексте регионального изучения Восточно-Европейской платформы. Дискуссионный характер существующих моделей формирования павловского комплекса вместе с ограниченной возможностью его площадного изучения ввиду недоступности к непосредственному наблюдению на большей части территории из-за перекрывающей осадочной толщи, делает необходимым актуализацию данных о распределении физических свойств с целью интерпретации результатов глубинного геолого-геофизического моделирования и их дальнейшего использования для геодинамических построений.

Базой для модельных построений и их истолкования служит распределение физических свойств пород изучаемого комплекса, последние данные о которых были получены в 80-х годах прошлого века и обобщены в работе [6]. Возросшие аппаратно-методические возможности лабораторных исследований физических свойств и вещественных характеристик, а также наличие нового каменного материала требуют с одной стороны актуализировать ретроспективные данные, а с другой – получить новые сведения.

Целью данной работы является создание надежной основы для интерпретации результатов геолого-геофизического моделирования павловского комплекса, включающей в себя комплекс взаимоувязанных данных: физические свойства, петрографическое описание и петрогеохимию.

Методика

Аналитические исследования вещественного состава включали изготовление и описание шлифов (20 штук) и рентгенофлуоресцентный анализ (45 проб). Для этого из каждой группы пород отбирались наиболее характерные для неё образцы с измеренными ранее петрофизическими характеристи-

ками. Материал образца, оставшийся после изготовления шлифа, дробился и истирался до размера частиц менее 0.01 мм. Из полученного порошка изготавливались препараты для рентгенофлуоресцентного анализа, который производился на приборе S8 TIGER, в центре коллективного пользования научным оборудованием ВГУ.

Определение петрофизических свойств производилось по 133 образцам, предварительно отобранных из месторождения Шкурлат (рис. 1), в петрофизической лаборатории кафедры геофизики ВГУ. В ходе исследования измерены: плотность, магнитная восприимчивость, скорость прохождения продольных волн. Плотность пород изучалась методом гидростатического взвешивания с использованием весов «HIGHLAND» HCB-1502. Магнитная восприимчивость определялась каппаметром КМ-7. Измерение скорости продольных волн производилось ультразвуковым дефектоскопом УК 10ПМС.

Геологическая позиция

Павловский мигматит-гранит-граносиенитовый комплекс наиболее широко развит в юго-восточной части ВКМ (рис. 1) и объединяет щелочные граниты, граносиениты и мигматиты. Морфологически этот комплекс представлен рядом куполообразных массивов длиной до 100 км и шириной до 30 км. Основной ареал его развития ограничен Лосевской шовной зоной за пределами которой встречается лишь эпизодически. Возраст магматических цирконов из гранитоидов павловского комплекса составляет 2060 – 2077 млн лет [7, 8].

Гранитоиды комплекса секут и мигматизируют гнейсы донской породной ассоциации и включают две фазы внедрения. Первая фаза представлена средне-крупнозернистыми преимущественно микроклиновыми гранитоидами: гранитами, граносиенитами, гнейсо-гранитами, гнейсо-граносиенитами, преобладающими в составе валов, куполов и мигматитовых зон. Ко второй фазе относятся лейкократовые средне-зернистые и аплитовидные граниты, пегматиты, рассекающие гранитоиды главной фации и супракрустальные породы в виде малых тел и жил [4].

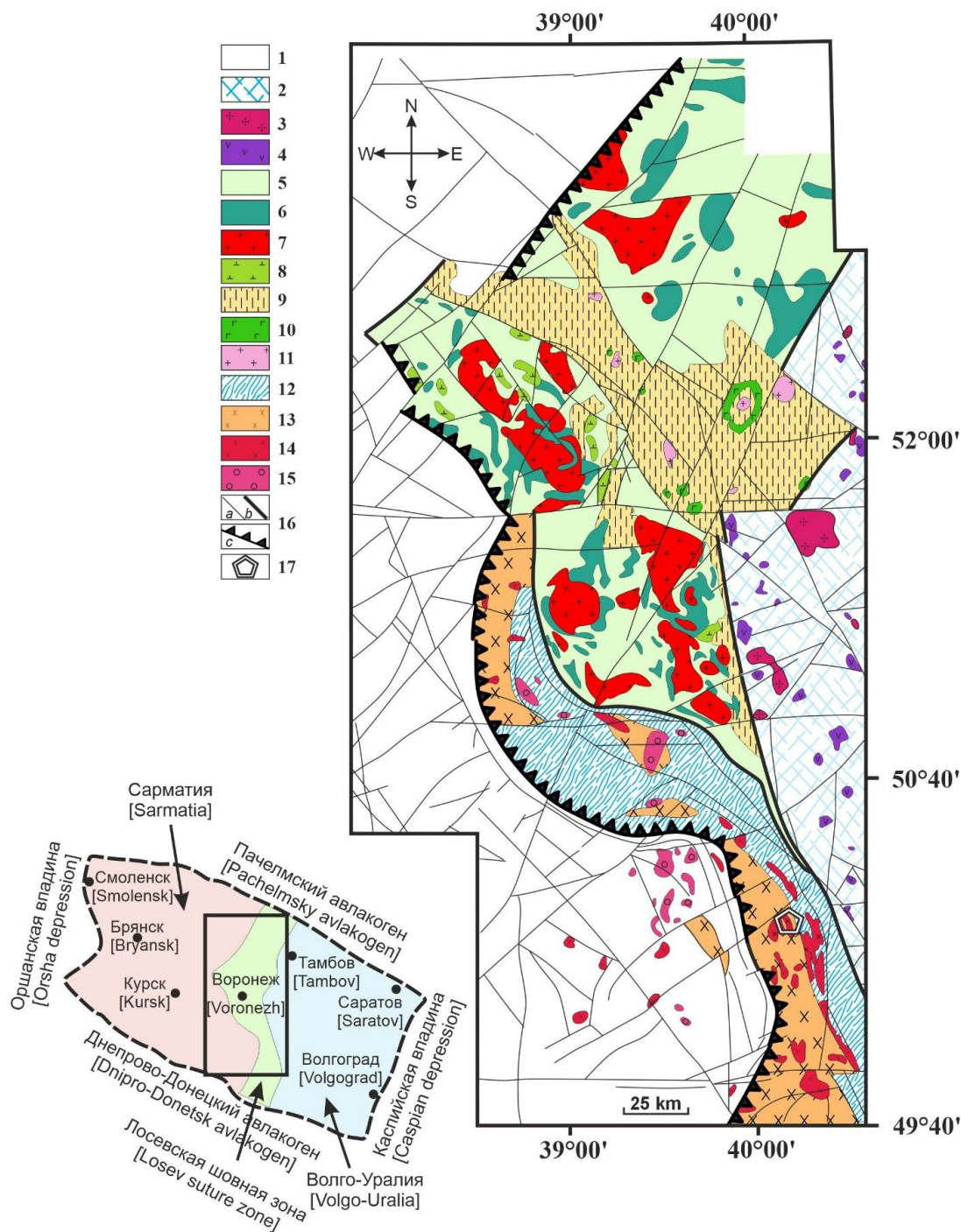


Рис. 1. Схема геологического строения Лосевской шовной зоны [9] с изменениями авторов: 1 – структурно-вещественные комплексы Сарматии; 2–4 – структурно-вещественные комплексы Волго-Уралии: 2 – воронцовская серия; 3 – бобровский гранитный комплекс; 4 – мамонский перидотит-габброноритовый и еланский норит-перидотитовый комплексы; 5–15 – структурно-вещественные комплексы Лосевской шовной зоны: 5 – лосевская серия стрелицкий тип; 6 – лосевская серия подгоренский тип; 7 – усманский плагиогранитный комплекс; 8 – рождественский габбровый комплекс; 9 – воронежская свита; 10, 11 – ольховский монзонит-габбронорит-гранитный комплекс (1, 2 фазы); 12 – донская породная ассоциация; 13, 14 – павловский мигматит-гранит-граносиенитовый комплекс (1, 2 фазы); 15 – лискинский гранитный комплекс; 16 – разрывные нарушения (a – постколлизийные; b – синколлизийные; c – позднеколлизийные); 17 – месторождение Шкурлат.

[Fig. 1. Scheme of geological structure of Losevo suture zone (modified after [9]): (1) – structural-material complexes of Sarmatia; (2–4) – structural-material complexes of Volgo-Uralia: (2) – Vorontsovskaya series; (3) – Bobrovsk granite complex; (4) – Mamon peridotite-gabbro-norite and Elan norite-peridotite complexes; (5–15) – structural-material complexes of Losevo suture zone: (5) – Losevo series Strelitskiy type; (6) – Losevo series Podgorenskiy type; (7) – Usman plagiogranite complex; (8) – Rozhdestvenskiy gabbro complex; (9) – Voronezh Formation; (10, 11) – Olkhov monzonite-gabbro-norite-gabbro-norite-granite complex (1, 2 phases); (12) – Don rock association; (13, 14) – Pavlovsk migmatite-granite-granodiorite complex (1, 2 phases); (15) – Liski granite complex; (16) – discontinuities ((a) – post-collisional; (b) – syn-collisional; (c) – late-collisional); (17) – Shkurlat deposit.]

Обсуждение результатов

Петрография

Щелочные граниты. Представлены в основном лейкократовыми разностями, лишь в некоторых образцах содержание темноцветных минералов достигает 10–15 %. Структура пород гипидиоморфнозернистая, гранитовая, с более высокой степенью идиоморфизма плагиоклаза по сравнению с КПШ. Породы состоят из кварца (30–35 %), щелочного полевого шпата (40–50 %), плагиоклаза (15–20 %) и небольшого количества цветных минералов (10–15 %), представленных биотитом и, редко, зелёной роговой обманкой. Присутствуют интенсивно милонитизированные разности, характеризующиеся бластомилонитовой структурой и полосчатой текстурой. Уцелевшие округлые и неправильной формы зерна КПШ и плагиоклаза (размером 0.1–0.4 мм) погружены в тонкоперетертый матрикс, составляющий порядка 70 % объема породы. В милонитизированном матриксе присутствуют новообразованные бластические зёрна кварца, образующие скопления в виде вытянутых в одном направлении линз и слойков толщиной 0.1–0.2 мм. Второстепенные минералы представлены единичными зёрнами гиперстена, образующегося по роговой обманке и, редкими ксеноморфными зёрнами кальцита.

Умеренно-щелочные граниты и умеренно-щелочные лейкограниты. Породы состоят из кварца (30–35 %), калиевого полевого шпата (25–35 %), плагиоклаза (25–30 %). Цветные минералы в лейкократовых разностях присутствуют в небольших количествах (до 5 %) и представлены, главным образом биотитом. В образцах 33/2 и 56/2 темноцветные минералы составляют 15 %, где – 5 % приходится на биотит, 10 % – на зелёную роговую обманку. Структура пород гипидиоморфнозернистая, гранитовая, с резким идиоморфизмом плагиоклаза по отношению к КПШ и кварцу. Породы слабо катаклазированы, отмечаются участки с неровными, зубчатыми очертаниями зёрен, с признаками дробления и частичной перекристаллизации. Второстепенные минералы представлены единичными чешуйками мусковита размером 0.1–0.15 мм. Присутствуют акцессорные апатит (единичные удлинённо-призматические кристаллы размером 0.07 мм), титанит (зерна неправильной формы размером 0.1–0.5 мм) и циркон (призматические зёрна размером 0.1–0.15 мм). Более мелкие зёрна циркона (порядка 0.001 мм) образуют включения в биотите, окруженные тонкими бурыми плеохроичными двориками.

Граносиениты. Породы состоят из калиевого полевого шпата (50–60%), меньших количеств плагиоклаза (15–20 %) и кварца (15 %), а также цветных минералов – зелёной (до голубовато-зеленой) роговой обманки (10–20 %) и биотита. Структура пород гипидиоморфнозернистая, присутствуют милонитизированные разности с грубомилонитовой структурой. Акцессорные минералы представлены единичными короткопризматическими зёрнами циркона размером 0.04–0.08 мм.

Гранодиориты. Породы состоят из плагиоклаза (40–45 %), КПШ (10–15 %), кварца (15–20 %), роговой обманки (10–15 %), биотита (10–15 %), рудного

минерала (<1%). Структура гранитовая с участками монцонитовой. Темноцветные минералы представлены голубовато-зеленой щелочной роговой обманкой и биотитом, которые образуют скопления (размером 2–3 мм, при размерах отдельных зёрен – 0.3–1 мм) и разнообразные срастания. Породы частично катаклазированы, присутствуют отдельные участки бластоцементной структуры, где крупные (0.3–1 мм) зерна плагиоклаза, реже амфибола, погружены в перетёртый и частично перекристаллизованный матрикс, состоящий из зёрен кварца, КПШ, плагиоклаза и чешуек темноцветных минералов.

Петрогеохимическая характеристика

Результаты представительных химических анализов петрогенных оксидов и элементов-примесей приведены в таблицах 1, 2. В рамках изученной выборки, породы павловского комплекса и обрамления по содержанию кремнезема варьируют в широких пределах от 46.9 до 77.8 % (гранитоиды ранней и поздней фаз генерации от 62 до 77.8 % SiO_2).

Согласно классификационной диаграмме TAS [10] гранитоиды ранней фазы включают в себя гранодиориты, граносиениты, умеренно-щелочные граниты, щелочные граниты и лейкограниты, а также щелочные сиениты (рис. 2а). Согласно [11] породы первой фазы представлены длинным петрохимическим рядом от известковой до щелочной серий (рис. 2б) и приурочены как к магнезиальному, так и к железистому типу (рис. 2с). По индексу насыщения глиноземом гранитоиды ранней фазы, за исключением одного образца, являются метаглиноземистыми (рис. 2д).

Гранитоиды поздней фазы генерации образуют короткую серию в пределах от 68.3 до 77.8 % SiO_2 и включают в себя умеренно-щелочные разности гранитов и лейкогранитов с единичными попаданиями в поля граносиенитов и нормально-щелочных лейкогранитов (рис. 2а). По модифицированному щелочному индексу [11] вторая фаза представлена рядом от известковой до известково-щелочной серии (рис. 2б) и равно относится к железистой и магнезиальной разностям (рис. 2с) метаглиноземистого типа (рис. 2д).

Состав гранитоидов павловского комплекса характеризуется уменьшением содержания петрогенных оксидов по мере увеличения содержания кремнезема (рис. 3а).

Характер распределения содержания кремнезема носит полимодальный характер, из которого можно выделить три типа пород, каждому из которых соответствует собственный экстремум (рис. 3а). Первый петрохимический тип со средним значением 64 % SiO_2 главным образом включает в себя щелочные сиениты и граносиениты; максимум со средним значением 69 % SiO_2 включает в себя большую часть амфибол-биотитовых гранитоидов ранней фазы, граносиениты, гранодиориты и два образца лейкогранитов поздней фазы; последний пик со средним значением 76 % соответствует лейкогранитам 2 фазы с подчиненной долей амфибол-биотитовых гранитоидов 1 фазы.

Табл. 1. Содержание петрогенных оксидов
в гранитоидах павловского комплекса и породах обрамления (мас. %)
[Table 1. The content of major oxides in granitoids of the Pavlovsk complex and surrounding rocks (wt. %)]

Петротип [Petrotype]	Образец [Sample]	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	ППП	Сумма
Амр-Бт гранитоид [Amp-Bt granitoid]	63\2	3.344	0.904	14.157	68.33	0.217	6.589	2.702	0.427	0.055	2.786	0.299	99.89
	5\2	4.997	1.814	7.704	69.15	0.364	6.467	3.574	0.646	0.09	4.037	0.396	99.378
	33\2	3.585	1.118	13.915	69.36	0.206	5.441	2.563	0.406	0.059	2.752	0.253	99.713
	54\2	3.265	0.612	12.74	69.42	0.149	4.838	1.719	0.329	0.161	5.8	0.584	99.691
	51\2	3.356	0.947	13.772	69.59	0.219	5.974	2.327	0.446	0.039	2.835	0.142	99.701
	44\2	3.03	0.763	13.897	69.65	0.148	7.441	1.633	0.343	0.047	2.233	0.583	99.792
	3\1	3.075	0.78	13.211	71.06	0.157	6.513	1.936	0.366	0.043	2.381	0.299	99.89
	37\2	2.863	0.668	12.871	71.74	0.143	6.741	1.771	0.362	0.039	2.106	0.412	99.761
	56\2	4.335	1.764	7.386	72.72	0.29	3.993	4.053	0.542	0.068	3.85	0.378	99.58
	26\2	4.89	1.866	5.571	72.89	0.312	5.63	3.572	0.588	0.076	3.856	0.136	99.496
	70\2	4.206	1.258	7.092	74.82	0.178	5.999	2.8	0.32	0.053	2.424	0.409	99.672
	34\2	4.5	1.36	4.774	75.41	0.274	5.446	3.457	0.495	0.06	3.483	0.131	99.547
Граносиенит [Granosyenite]	66\2	3.723	1.594	13.495	67.21	0.314	4.436	3.341	0.541	0.084	4.128	0.706	99.591
	27\2	3.694	1.45	14.577	66.14	0.304	5.63	3.208	0.485	0.079	3.472	0.448	99.633
	5\1	2.661	1.615	17.083	62.07	0.228	6.558	1.934	1.118	0.079	5.862	0.263	99.777
	13\2	4.185	1.957	15.643	62	0.441	4.881	4.323	0.607	0.077	5.075	0.252	99.583
	10\2	4.288	2.052	9.488	66.24	0.461	5.666	4.266	0.673	0.085	5.652	0.528	99.52
Щел. сиенит [Alk. syenite]	2\1	3.558	0.623	15.567	62.31	0.2	8.63	2.848	0.73	0.072	3.628	1.414	99.635
	11\1	3.635	0.48	15.701	62.6	0.202	8.369	3.21	0.713	0.076	3	1.623	99.65
	13\1	3.96	0.84	16.463	63.68	0.192	8.405	2.058	0.648	0.062	2.964	0.402	99.769
	9\1	3.45	0.33	14.847	66.86	0.097	8.296	2.117	0.533	0.05	2.272	0.935	99.87
Лейкогранит [Leucogranite]	16\1	2.399	0.649	11.357	68.26	0.122	5.179	5.744	0.272	0.1	2.32	3.432	99.935
	57\2	3.522	0.214	12.672	71.99	0.034	5.174	1.426	0.126	0.148	4.473	0.089	99.962
	67\2	3.545	0.7	12.339	73.01	0.153	4.838	2.188	0.284	0.039	2.198	0.287	99.625
	49\2	3.261	0.323	12.621	74.15	0.076	5.062	2.035	0.196	0.037	1.507	0.384	99.722
	8\1	2.637	0.273	12.089	74.2	0.065	6.738	1.321	0.181	0.048	1.55	0.651	99.869
	80\2	3.618	0.319	12.759	75.35	0.054	4.94	1.434	0.128	0.022	1.013	0.256	99.929
	86\2	2.542	0.271	11.876	75.53	0.055	6.782	1.339	0.154	0.02	1.037	0.302	99.962
	36\2	3.425	0.216	12.177	76.8	0.012	4.677	1.548	0.109	0.019	0.572	0.126	99.726
	17\1	3.378	0.363	6.269	76.98	0.075	5.582	1.301	0.191	0.04	5.47	0.134	99.869
	58\2	3.764	0.115	11.688	77.8	0.02	3.682	1.629	0.062	0.07	0.597	0.216	99.731
Гранодиорит [Granodiorite]	73\2	4.844	3.444	8.158	66.82	0.446	2.085	5.575	0.767	0.125	6.961	0.537	99.874
	15\3	3.98	2.121	13.424	66.23	0.338	3.152	4.51	0.621	0.09	4.863	0.268	99.678
Мигматит [Migmatite]	41\2	4.135	2.552	16.106	58.81	0.413	5.15	4.311	0.787	0.089	6.411	0.398	99.302
	72\2	2.747	1.291	11.669	71.65	0.126	5.178	2.827	0.324	0.076	3.11	0.518	99.655
	82\2	2.609	5.829	13.253	46.87	0.542	4.983	8.959	1.056	0.163	10.206	5.103	99.68
	17\3	3.37	5.904	12.129	52.21	0.258	2.399	8.208	0.677	0.175	13.492	0.626	99.765
	3\3	3.079	4.985	7.63	58.2	0.494	4.823	7.763	1.015	0.219	10.366	0.91	99.52
	16\3	4.205	2.867	15.667	58.25	0.817	4.916	4.246	1.136	0.066	6.29	0.606	99.367
	4\3	3.314	4.411	12.986	60.36	0.442	3.831	6.002	0.7	0.139	6.809	0.513	99.604
Амфиболит [Amphibolite]	1\3	2.787	6.157	12.287	53.5	0.616	4	8.397	1.201	0.207	9.669	0.665	99.556
	10\3	3.395	9.486	7.964	57.07	0.476	2.769	8.637	0.922	0.146	8.512	0.379	99.866

Табл. 2. Содержание элементов-примесей в гранитоидах павловского комплекса и породах обрамления (ppm)
 [Table 2. The content of trace elements in granitoids of the Pavlovsk complex and surrounding rocks (ppm)]

Петротип [Petrotype]	Образец [Sample]	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sn	Sb	Cs	Ba	Ce	Pb	Th	U
Амр-Вт гранитоид [Amr-Bt granitoid]	63I2	0	36	39	15	15	5	34	15	1	130	415	9	110	11	2	3	4	741	183	29	9	7
	5I2	0	46	23	10	16	1	37	15	2	120	425	6	80	10	2	5	4	910	137	38	9	8
	33I2	0	37	4	12	8	0	30	13	2	98	284	10	92	11	1	5	4	769	132	30	5	6
	54I2	0	36	2	12	9	5	27	13	1	95	169	3	106	6	20	3	4	638	85	21	7	5
	51I2	0	39	8	15	12	10	35	13	3	115	343	6	165	9	2	4	4	810	231	28	10	7
	44I2	0	19	12	18	4	6	16	12	0	137	191	2	105	5	1	4	2	452	174	31	11	5
	3I1	0	32	25	18	14	9	29	14	1	120	373	9	177	10	2	5	4	691	291	30	16	7
	37I2	0	24	15	24	3	0	21	11	3	97	222	5	76	5	2	4	3	536	156	23	6	6
	56I2	0	55	35	13	17	14	30	16	3	57	656	6	72	7	2	6	4	937	122	30	8	10
	26I2	0	50	30	15	24	4	40	18	0	151	648	9	107	14	3	7	5	997	147	39	11	9
Граносиенит [Granosyenite]	70I2	0	73	74	23	25	14	39	15	3	79	591	8	75	9	3	6	5	926	45	27	7	9
	34I2	13	39	0	9	17	6	24	13	0	85	338	6	78	8	3	7	3	794	114	29	4	7
	66I2	0	60	42	7	13	6	44	15	1	112	519	6	82	10	2	6	6	906	107	31	6	8
	27I2	0	52	63	10	11	6	42	15	3	119	373	11	120	12	2	3	5	955	173	32	6	7
	5I1	0	145	81	8	23	13	23	11	18	47	103	10	86	7	1	3	8	1359	16	26	6	5
	13I2	0	81	30	13	21	15	48	19	1	110	583	9	166	10	2	6	5	1034	212	36	17	9
	10I2	0	76	32	11	17	19	45	16	2	116	537	8	126	9	2	8	5	1053	208	33	16	9
	2I1	0	43	6	7	9	2	40	15	1	157	210	33	448	23	3	5	7	1013	354	33	18	5
	11I1	0	38	5	3	5	0	38	14	1	124	155	27	316	19	2	5	5	950	289	30	9	5
	13I1	9	38	0	4	9	4	41	15	1	146	230	28	363	21	1	7	28	1012	242	41	12	6
Лейкогранит [Leucogranite]	9I1	0	26	0	10	11	1	22	15	1	152	112	31	349	21	2	6	4	761	261	40	16	5
	16I1	0	20	0	11	6	0	35	11	4	105	124	2	62	6	0	3	2	379	64	25	11	5
	57I2	0	20	1675	15	5	2	12	11	5	110	81	7	24	10	0	1	1	220	38	26	2	4
	67I2	0	35	5	10	7	6	22	12	1	87	461	3	47	7	2	4	2	540	156	28	6	8
	49I2	0	12	29	18	5	0	27	15	99	146	152	4	74	8	1	4	2	405	62	27	12	5
	8I1	0	21	9	13	13	3	14	11	2	103	164	2	60	4	2	5	1	339	54	25	4	5
	80I2	8	11	0	15	7	0	18	12	0	133	98	2	36	6	0	2	1	290	52	25	7	4
	86I2	0	10	32	29	7	0	15	10	4	129	98	2	34	5	1	3	1	310	68	23	7	5
	36I2	0	12	8	18	6	0	5	10	0	62	411	1	34	4	2	4	1	374	117	31	7	8
	17I1	0	18	6	13	3	5	16	14	6	148	217	1	121	5	2	6	2	422	144	47	11	6
Гранодиорит [Granodiorite]	58I2	0	11	42	19	7	0	11	10	2	47	356	1	33	3	2	4	1	219	64	31	32	8
	73I2	0	93	146	21	38	8	77	19	2	93	520	7	87	9	4	6	6	1102	13	30	7	9
	15I3	0	3	7	25	9	63	2	13	3	119	184	1	18	3	1	5	0	126	26	34	2	5
	41I2	0	87	10	4	11	16	47	16	1	136	553	7	202	9	2	5	7	1203	139	27	6	9
	72I2	0	42	119	18	11	4	25	11	202	80	244	5	35	7	1	3	3	577	59	27	6	6
Мигматит [Migmatite]	82I2	1	142	376	12	71	1	138	17	0	167	454	12	87	11	0	5	12	1403	15	18	5	8
	17I3	16	123	293	31	109	3	86	17	1	185	502	16	127	24	3	6	13	1774	98	27	15	8
	3I3	0	116	298	24	67	9	93	17	0	81	547	22	100	14	3	6	9	1343	112	34	7	9
	16I3	7	104	39	12	23	18	53	14	14	75	670	15	225	15	4	5	11	1830	277	22	8	10
	4I3	7	96	240	19	43	2	76	16	2	67	518	19	67	12	4	7	6	1201	92	31	6	9
Амфиболит [Amphibolite]	1I3	0	31	8	12	5	0	22	11	1	95	204	6	83	9	1	5	3	632	157	25	7	6
	10I3	15	162	652	30	149	9	60	14	1	97	494	13	85	7	4	7	7	1251	11	25	6	8

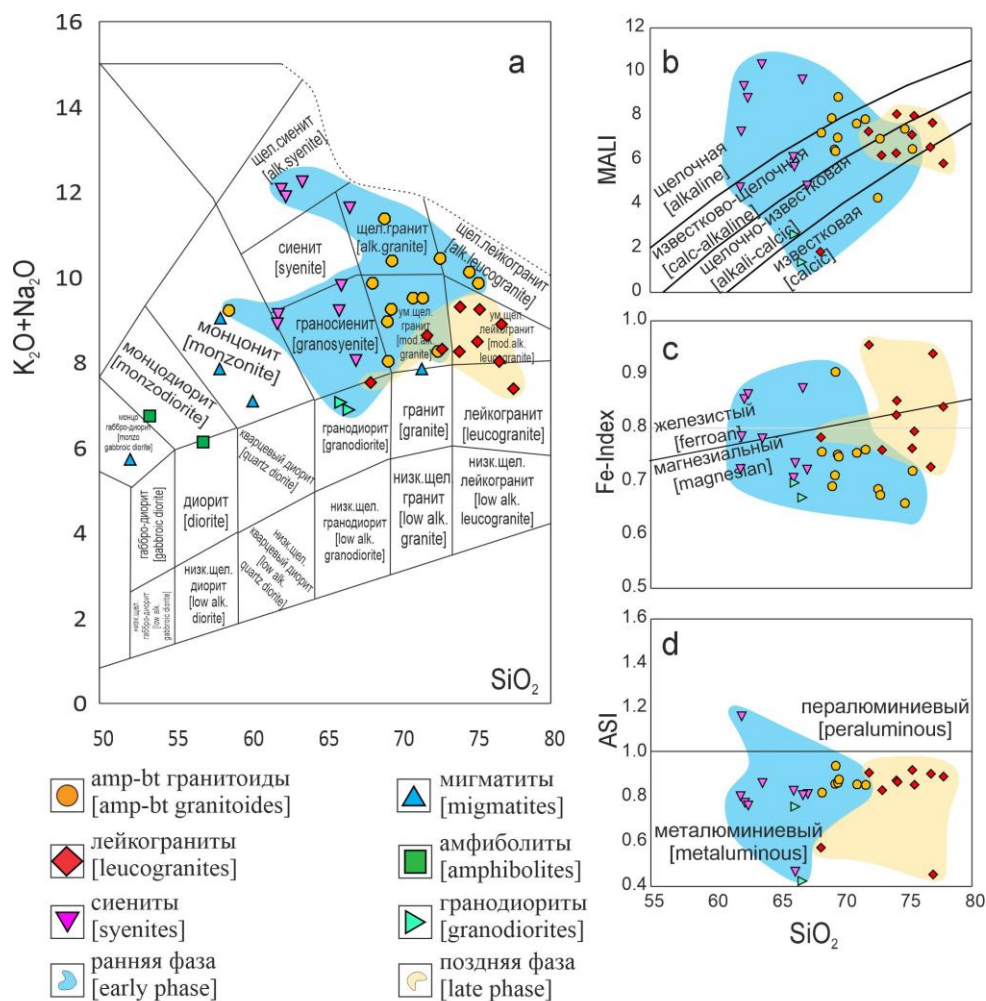


Рис. 2. Состав гранитоидов павловского комплекса и пород обрамления на классификационных диаграммах: *a* – TAS [10]; *b* – ($MALI = Na_2O + K_2O - CaO$) – SiO_2 [11]; *c* – ($Fe-Index = FeO / (MgO + FeO)$) – SiO_2 [11]; *d* – ($ASI = Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$) – SiO_2 .

[Fig. 2. Composition of granitoids of the Pavlovsk complex and surrounding rocks: (*a*) – TAS [9]; (*b*) – ($MALI = Na_2O + K_2O - CaO$) vs SiO_2 [10]; (*c*) – ($Fe-Index = FeO / (MgO + FeO)$) vs SiO_2 [10]; (*d*) – ($ASI = Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$) vs SiO_2 .]

Наблюдаемая дифференциация усиливается при добавлении в признаковое пространство суммы высокочargedных и крупноионных литофильных элементов. На трехмерных диаграммах рассеяния $\Sigma HFSE / LILE - K_2O - SiO_2$ (рис. 3b–c), помимо уже выявленной дифференциации по SiO_2 , наблюдается четкое разделение сиенитов на две группы с различным содержанием HFSE и LILE.

Обобщенно, лейкограниты поздней фазы генерации, относительно пород первой фазы, отличаются пониженными содержаниями HFSE и LILE, также отмечается заметное уменьшение содержания петрогенных оксидов. Из числа гранитоидов ранней фазы выделяются щелочные сиениты, которые сильно обогащены HFSE, K_2O и приурочены к железистому типу щелочной серии пород. Осредненные значения составов приведены в таблице 3.

Петрофизические свойства

Широкая вариативность состава пород павловской ассоциации находит своё отражение в петрофизичес-

ких характеристиках, среди которых наибольшей степенью взаимосвязи с вещественным наполнением характеризуется плотность. Так, гранитоиды двух фаз приурочены к петроплотностной группе в пределах от 2.61 до 2.70 г/см³ и средним значением 2.65 г/см³, при этом внутри подгруппы выделяются лейкограниты со средним значением 2.63 г/см³. Мигматиты представлены в различной степени гранитизированными амфиболитами, что выражается в распределении плотности от 2.65 до 2.78 г/см³ и наличии выраженной отрицательной асимметрии. Распределение плотности амфиболитов носит бимодальный характер со средними значениями пиков 2.83 и 2.89 г/см³. Наблюдаемые вариации плотности обусловлены, главным образом, содержанием темноцветных минералов и полевых шпатов, что видно из характера взаимосвязи параметра плотности с оксидами железа, магния и кальция (рис. 4d). Кроме того, плотность гранитоидов обеих фаз имеет положительную корреляционную зависимость с параметром магнитной восприимчивости (коэффициент корреляции = 0.65).

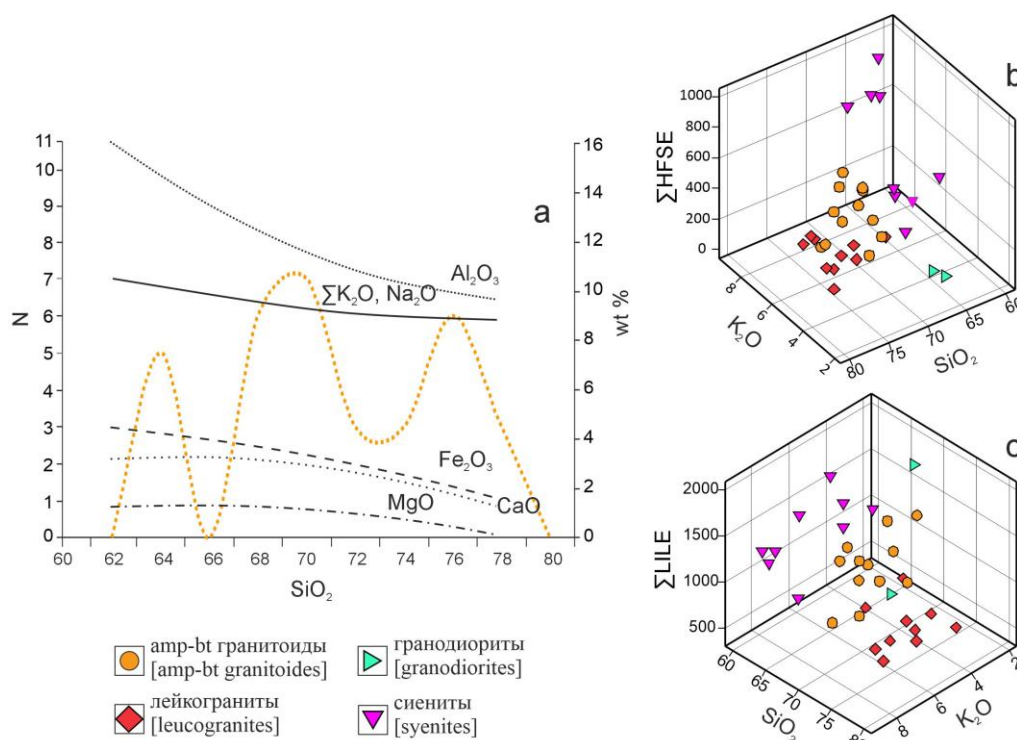


Рис. 3. Вариации состава гранитоидов павловского комплекса: *a* – сводная диаграмма Харкера по некоторым петрогенным оксидам; *b* – ΣHFSE (ppm) – K_2O (мас. %) – SiO_2 (мас. %); *c* – ΣLILE (ppm) – K_2O (мас. %) – SiO_2 (мас. %).

[**Fig. 3.** Variations of composition of granitoids of the Pavlovsk complex: (*a*) – Harker summary diagram for some petrogenic oxides (wt. %); (*b*) – ΣHFSE (ppm) – K_2O (wt. %) – SiO_2 (wt. %); (*c*) – ΣLILE (ppm) – K_2O (wt. %) – SiO_2 (wt. %).]

Табл. 3. Сводная таблица состава гранитоидов павловского комплекса

[**Table 3.** Summary table of composition of granitoids of Pavlovsk complex]

Петротип [Petrotype]		SiO_2	K_2O	ASI	Fe-Index	MALI	ΣHFSE	ΣLILE
Сие- нит [Sye- nit]	Щелочной [Alkaline]	63.9	8.4	0.8	Железистый [Ferroan]	A	764	1267
	Граносиенит [Granosyenite]	64.7	5.4	0.8	Магнезиальный [Magnesian]	CA	327	1591
Amp-Bt гранитоид [Amp-Bt granitoid]		71.2	5.9	0.6	Магнезиальный [Magnesian]	CA	317	1266
Лейкогранит [Leucogranite]		74.4	5.3	0.8	Железистый/магнезиальный [Ferroan/magnesian]	AC/CA	188	674
Гранодиорит [Granodiorite]		66.5	2.6	0.6	Магнезиальный [Magnesian]	C/AC	126	1075

Примечание: содержания SiO_2 и K_2O в мас. %; ΣHFSE и ΣLILE в ppm; А – щелочная, СА – известково-щелочная, АС – щелочно-известковистая, С – известковистая серии.

[*Note:* SiO_2 and K_2O contents in wt. %; ΣHFSE and ΣLILE in ppm; A – alkaline, CA – calcic-alkaline, AC – alkali-calcic, C – calcic series.]

Магнитная восприимчивость пород рассматриваемой ассоциации варьирует в широких пределах от 0.19 до 50.20×10^{-3} ед. СИ (рис. 4b). Распределение магнитной восприимчивости гранитоидов ранней фазы носит бимодальный характер: экстремум с положительной асимметрией и средним значением 18×10^{-3} ед. СИ включает в себя амфибол-биотитовые гранитоиды и граносиениты; второй максимум со средним значением 45×10^{-3} ед. СИ относится к щелочным сиенитам. Лейкограниты поздней фазы генерации отличаются единственным пиком со средним

значением 12×10^{-3} ед. СИ. По своим магнитным свойствам подавляющее большинство гранитоидов павловского комплекса относится к магнетитовой серии [12]. Мигматиты представлены полимодальным распределением магнитной восприимчивости, обусловленным различным составом лейкосомы: в наиболее магнитных разностях она представлена щелочными сиенитами, в наименее магнитных – лейкогранитами. Магнитная восприимчивость пород тесно коррелирует с содержанием HFSE (рис. 5b).

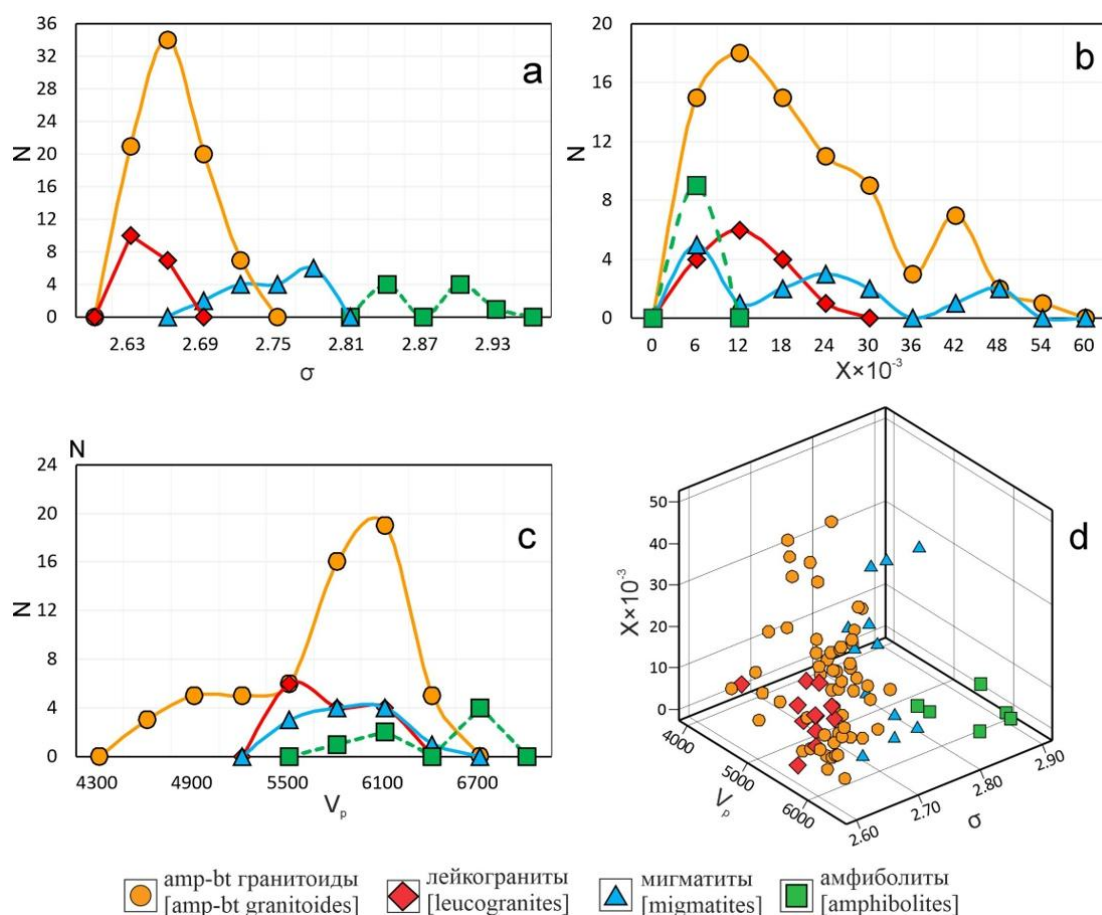


Рис. 4. Физические свойства гранитоидов павловского комплекса и пород обрамления: *a* – плотность (σ , г/см³); *b* – магнитная восприимчивость (X , ед. СИ); *c* – скорость прохождения продольных волн (V_p , м/с); *d* – 3D диаграмма рассеяния σ - X - V_p .
[Fig. 4. Physical properties of granitoids of the Pavlovsk complex and surrounding rocks: (*a*) – density (σ , g/cm³); (*b*) – magnetic susceptibility (X , unit. SI); (*c*) – longitudinal wave velocity (V_p , m/s); (*d*) – 3D scatter diagram σ - X - V_p .]

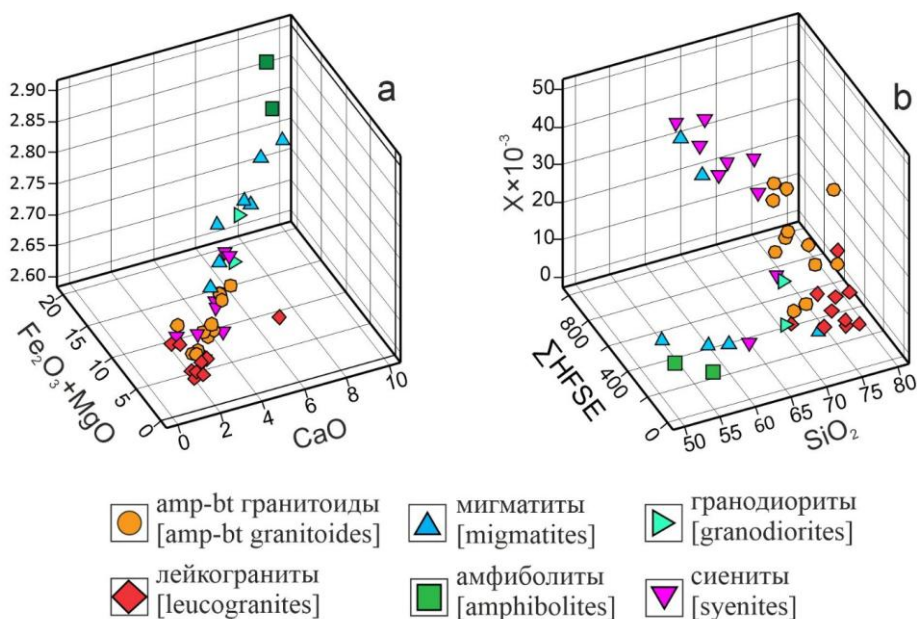


Рис. 5. Взаимосвязь физических свойств и вещественного состава на 3D диаграммах рассеяния: *a* – магнитная восприимчивость (X) (ед. СИ) – Σ HFSE (ppm) – SiO_2 (мас. %); *b* – плотность (σ , г/см³) – $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ (мас. %) – CaO (мас. %).
[Fig. 5. Relationship between physical properties and material composition on 3D scatter diagrams: (*a*) – magnetic susceptibility (X , unit. SI) – Σ HFSE (ppm) – SiO_2 (wt. %); (*b*) – density (σ , g/cm³) – $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ (wt. %) – CaO (wt. %).]

По скорости прохождения продольных волн изученная выборка пород изменяется в пределах от 5500 до 6400 м/с. При этом отмечается отрицательная асимметрия распределения для гранитоидов ранней фазы, обусловленная зонами милонитизации (рис. 4с).

Результаты изучения петрофизических парамет-

ров сведены в таблицу 4, при составлении которой использовались только образцы с определенным вещественным составом, что позволяет осуществить надежную привязку физических свойств к конкретному петротипу.

Табл. 4. Физические свойства гранитоидов павловского комплекса и пород обрамления
[Table 4. Physical properties of granitoids of the Pavlovsk complex and surrounding rocks]

Петротип [Petrotype]		σ , г/см ³ [σ , g/cm ³]		$X \times 10^{-3}$ ед. СИ [$X \times 10^{-3}$ unit. SI]		V_p , м/с [V_p , m/s]	
		Диапазон [range]	Среднее [average]	Диапазон [range]	Среднее [average]	Диапазон [range]	Среднее [average]
Сиенит [Syenite]	Щелочной [Alkaline]	2.63-2.66	2.65	32.03-45.32	38.92	4883-6076	5671
	Граносиенит [Granosyenite]	2.62-2.73	2.69	5.98-44.35	29.09	5547-5912	5758
Amp-Bt гранитоид [Amp-Bt granitoid]		2.64-2.70	2.67	6.97-38.71	23.13	4946-5865	5533
Лейкогранит [Leucogranite]		2.62-2.66	2.64	1.98-16.44	7.93	4816-6020	5624
Гранодиорит [Granodiorite]		2.72-2.75	2.74	10.77-19.65	15.21	5439-5567	5503
Мигматит [Migmatite]		2.65-2.78	2.73	2.47-47.80	17.40	5628-6236	5969
Амфиболит [Amphibolite]		2.84-2.89	2.87	0.28-0.29	0.29	6219-6220	6220

Закключение

Установленный характер связи петрогенных оксидов и элементов-примесей с петрофизическими свойствами позволяет с высокой степенью точности производить дифференциацию гранитоидов павловского комплекса и пород обрамления по измеренным физическим параметрам. Это дает надежную базу для интерпретации результатов геолого-геофизического моделирования с их последующей интеграцией в геодинамические модели Лосевской шовной зоны и ВКМ.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

- Египко О. И. Некоторые минералого-петрографические и геохимические особенности докембрийских гранитоидов юго-восточной части Воронежского кристаллического массива: дисс. ... канд. геол.мин. наук. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1971. 367 с.
- Чернышов Н. М., Ненахов В. М., Лебедев И. П., Стрик Ю. Н. Геодинамическая модель формирования ВКМ // *Геотектоника*. 1997. № 3. С. 21–31.
- Ненахов В. М., Бондаренко С. В. Тектоническая эволюция Лосевской шовной зоны Воронежского кристаллического массива в палеопротерозое // *Геотектоника*. 2011. № 4. С. 43–59.
- Никитин А. В., Ненахов В. М. О происхождении гранитоидов павловского комплекса и их структурных преобразованиях на стадии консолидированной коры // *Вестник*

Воронежского государственного университета Серия Геология. 2017. №3. С. 46–60.

- Терентьев Р. А., Савко К. А. Минеральная термобарометрия и геохимия палеопротерозойских магнезиально-калиевых гранитоидов павловского плутона, Восточно-Европейский кратон // *Вестник Воронежского государственного университета Серия Геология*. 2017. № 3. С. 34–45.
- Глазнев В. Н., Муравина О. М., Жаворонкин В. И., Лебедев И. П., Воронова Т. А. Петроплотностная карта докембрийского фундамента Воронежского кристаллического массива. Воронеж: ИПЦ Научная книга, 2020. 101 с.
- Terentiev R. A., Savko K. A., Petrakova M. E., Santosh M., Korish E. H. Paleoproterozoic granitoids of the Don terrane, East-Sarmatian Orogen: age, magma source and tectonic implications // *Precambrian Res.* 2020. Vol. 346.
- Бибикова Е. В., Богданова С. В., Постников А. В., Попова Л. П., Киризова Т. И., Фугзан М. М., Глушенко В. В. Зона сочленения Сарматии и Волго-Уралии: изотопно-геохронологическая характеристика супракrustальных пород и гранитоидов // *Стратиграфия. Геол. Корреляция*. 2009. Т. 17. № 6. С. 3–16.
- Ненахов В. М. Минерагенические исследования территорий с двухъярусным строением на примере Воронежского кристаллического массива. М.: ГЕОКАРТ. ГЕОС, 2007. 284 с.
- Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. Издание второе, переработанное и дополненное. СПб.: ВСЕ-ГЕИ, 2008. 200 с.
- Frost B. R., Barnes C. G., Collins W. J. et. al. A geochemical classification for granitic rocks // *J. Petrol.* 2001. Vol. 42. P. 2033–2048.
- Ishihara S. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks // *Min. Geol.* 1977. 27. P. 293–305.

**Petrophysical and petrological characteristics
of granitoids of the Pavlovsk complex
(Voronezh crystalline massif)**

©2025 V. V. Ilin¹✉, V. I. Zhavoronkin¹, E. V. Nenakhova²

¹*Voronezh State University, Universitetskaya sq., 1,
394018, Voronezh, Russian Federation*

²*LLC "Rock and Mill", Vasilisy Kozhinoj 1,
121096, Moscow, Russian Federation*

Abstract

Introduction: the study of the Pavlovsk migmatite-granite-granosienite complex is of key importance in the formation of the geodynamic model of the Losevo suture zone development. The presence of an overlapping sedimentary cover does not allow for a direct study of the morphology and thickness of the complex under consideration, which makes it necessary to use the results of modern geological and geophysical modeling. The purpose of this work is to create a reliable basis for interpreting the results of geological and geophysical modeling based on a set of interrelated data (petrographic description, petro- and geochemistry, physical properties).

Methodology: analytical studies of the material composition included the manufacture and description of grinders (20 pieces) and X-ray fluorescence analysis (45 samples), which was performed on the S8 TIGER device at the VSU Center for the collective use of scientific equipment. The density of rocks was studied by hydrostatic weighing using scales "HIGHLAND" HCB-1502. The magnetic susceptibility was determined by a KM-7 kappameter. The velocity of the longitudinal waves was measured with an ultrasonic flaw detector UK 10PMS.

Discussion of the results: granitoids of the Pavlovsk complex in the studied sample are represented by granosyenites, moderate-alkaline/alkaline granites, leucogranites and alkaline syenites. Granitoids of the first phase are represented by a long petrochemical series from calcareous to alkaline series, granitoids of the second generation phase are from calcareous to calcareous-alkaline. The density of granitoids varies from 2.61 to 2.70 g/cm³ with an average value of 2.65 g/cm³, and late-phase leucogranites with an average value of 2.63 g/cm³ are distinguished within the subgroup. The distribution of the magnetic susceptibility of granitoids of the early phase is bimodal in nature: an extremum with a positive asymmetry and an average value of 18×10^{-3} SI units includes amphibole-biotite granitoids and granosyenites; the second maximum with an average value of 45×10^{-3} SI units refers to alkaline syenites. Leucogranites of the late generation phase are distinguished by a single peak with an average value of 12×10^{-3} SI units. In terms of the velocity of longitudinal waves, the studied sample of rocks has a similar range of parameter variability from 5500 to 6400 m/s. The density is correlated with iron, magnesium, and calcium oxides ($R=0.8$). The magnetic susceptibility of rocks is closely correlated with the content of high field strength elements ($R=0.7$). The data obtained is summarized in a table.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Vitaliy V. Ilin, e-mail: vitaliy.ilin.2000@bk.ru

Conclusion: the close correlations of the composition with petrophysical properties make it possible to accurately segregate the rocks of the complex and the framing according to the measured physical parameters, which makes it possible to reliably interpret the results of geological and geophysical modeling with subsequent integration of the latter into geodynamic models.

Keywords: Voronezh crystal massif, Pavlovsk complex, granitoids, petrophysics, petrochemistry, geochemistry.

Funding: The research was carried out at the expense of the Russian Science Foundation, project 25-27-00209.

For citation: Ilin V. V., Zhavoronkin V. I., Nenakhova E. V. Petrophysical and petrological characteristics of granitoids of the Pavlovsk complex (Voronezh crystalline massif) // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2025, no. 2, pp. 50–61. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/2/50–61>

Conflict of interest: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Egipko O. I. *Nekotorye mineralogo-petrograficheskie i geokhimicheskie osobennosti dokembrijskikh granitoidov yugo-vostochnoj chasti Voronezhskogo kristallicheskogo massiva*: dis. ... kand. geol. min. nauk [Some mineralogical, petrographic and geochemical features of Precambrian granitoids of the southeastern part of the Voronezh crystalline massif. PhD diss]. Voronezh, VSU publ., 1971. 367 p. (In Russ.)
2. Chernyshov N. M., Nenakhov V. M., Lebedev I. P., Strick Yu. N. Geodinamicheskaya model' formirovaniya VKM [Geodynamic model of VCM formation]. *Geotektonika – Geotectonics*, 1997, no. 3, pp. 21–31 (In Russ.)
3. Nenakhov V. M., Bondarenko S. V. Tektonicheskaya ehvoluciya Losevskoj shovnoj zony Voronezhskogo kristallicheskogo massiva v paleoproterozoe [Tectonic evolution of the Losev suture zone of the Voronezh crystalline massif in the Paleoproterozoic]. *Geotektonika – Geotectonics*, 2011, no. 4, pp. 43–59 (In Russ.)
4. Nikitin A. V., Nenakhov V. M. O proiskhozhdenii granitoidov pavlovskogo kompleksa i ikh strukturnykh preobrazovaniyakh na stadii konsolidirovannoj kory [On the origin of granitoids of the Pavlovsk complex and their structural transformations at the stage of consolidated crust]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2017, no. 3, pp. 46–60 (In Russ.)
5. Terentyev R. A., Savko K. A. Mineral'naya termobarometriya i geokhimiya paleoproterozojkskikh magnezial'no-kalievyykh granitoidov pavlovskogo plutona, Vostochno-Evropejskij kraton [Mineral thermobarometry and geochemistry of Paleoproterozoic magnesio-potassium granitoids of the Pavlovsk Pluto, East European craton]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2017, no. 3, pp. 34–45 (In Russ.)
6. Glaznev V. N., Muravina O. M., Zhavoronkin V. I., Lebedev I. P., Voronova T. A. *Petroplotnostnaya karta dokembrijskogo fundamenta Voronezhskogo kristallicheskogo massiva* [Petrodensity map of the Precambrian basement of the Voronezh crystalline massif]. Voronezh, CPI Scientific Book publ., 2020. 101 p. (In Russ.)
7. Terentiev R. A., Savko K. A., Petrakova M. E., Santosh M., Korish E. H. Paleoproterozoic granitoids of the Don terrane, East-Sarmatian Orogen: age, magma source and tectonic implications. *Precambrian Res.*, 2020, vol. 346.
8. Bibikova E. V., Bogdanova S. V., Postnikov A. V., Popova L. P., Kirnozova T. I., Fugzan M. M., Glushchenko V. V. Zona sochleneniya Sarmatii i Volgo-Uralii: izotopno-geokhronologicheskaya kharakteristika suprakrustal'nykh porod i granitoidov [The junction zone of Sarmatia and Volga-Uralia: isotope-geochronological characteristics of supracrustal rocks and granitoids]. *Stratigrafiya i geologicheskaya korrelyatsiya – Stratigraphy and geological correlation*, 2009, vol. 17, no. 6, pp. 3–16 (In Russ.)
9. Nenakhov V. M. *Mineragenicheskie issledovaniya territorij s dvukh'yarusnym stroeniem na primere Voronezhskogo kristallicheskogo massiva* [Mineragenic studies of territories with a two-tiered structure on the example of the Voronezh crystal massif]. Moscow, GEOKART. GEOS publ., 2007. 284 p. (In Russ.)
10. Petrograficheskij kodeks Rossii. Magmaticheskie, metamorficheskie, metasomaticheskie, impaktnye obrazovaniya. Izdanie vtoroe, pererabotannoe i dopolnennoe [The Petrographic Code of Russia. Igneous, metamorphic, metasomatic, and impact formations. Second edition, revised and expanded]. Saint Petersburg, VSEGEI publ., 2008. 200 p. (In Russ.)
11. Frost B. R., Barnes C. G., Collins W. J. et. al. A geochemical classification for granitic rocks. *J. Petrol.*, 2001, vol. 42, pp. 2033–2048.
12. Ishihara S. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Min. Geol.*, 1977, 27, pp. 293–305.

Ильин Виталий Викторович, аспирант, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация, e-mail: vitaliy.ilin.2000@bk.ru;

ORCID <https://orcid.org/0009-0008-2028-043X>

Жаворонкин Валерий Иванович, к.г.-м.н., доцент, Воронежский государственный университет, Воронеж, РФ; e-mail: zhavoronkin@geol.vsu.ru;

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0648-4117>

Ненахова Екатерина Викторовна, вед. геолог, ООО "Рок Энд Милл", Москва, РФ, e-mail: evnenakhova@mail.ru;

ORCID <https://orcid.org/0009-0003-0115-647X>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Vitaliy V. Ilin, postgraduate student, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: vitaliy.ilin.2000@bk.ru;

ORCID <https://orcid.org/0009-0008-2028-043X>

Valery I. Zhavoronkin, PhD. in Geol-Min, Associate Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: zhavoronkin@geol.vsu.ru;

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0648-4117>

Ekaterina V. Nenakhova, Leading geologist, LLC "Rock and Mill", Moscow, Russian Federation, e-mail: evnenakhova@mail.ru;

ORCID <https://orcid.org/0009-0003-0115-647X>

Authors have read and approved the final manuscript