

УДК 552.08:537

## ВЗАИМОСВЯЗИ МАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД ОСТРОВОВ АРГЕНТИНСКОГО АРХИПЕЛАГА

**С.И. Шепель**, Б.Я. Савенко, М.В. Кравчук

*Институт геофизики НАН Украины; Палладина, 32, Киев-142, e-mail: nekh@igph.kiev.ua*

**Реферат.** Важной проблемой геофизики является комплексное исследование корреляционных зависимостей между физическими параметрами различных типов горных пород. Установлено наличие взаимозависимостей между электрическими и магнитными характеристиками кристаллических пород Аргентинского архипелага. Наиболее достоверной оказалась прямо пропорциональная связь между магнитной восприимчивостью и диэлектрической проницаемостью. Магнитная восприимчивость также связана прямой пропорциональной зависимостью с остаточной намагниченностью исследованных пород. Установлено влияние плотности на изменение некоторых электрических и магнитных параметров. Вариации электрических и магнитных характеристик, их взаимосвязи определяются петрохимическими и генетическими особенностями минералов рудной фракции.

**Взаємозв'язки магнітних і електричних властивостей порід островів Аргентинського архіпелагу.** **С.І. Шепель**, Б.Я. Савенко, М.В. Кравчук

**Реферат.** Важливою проблемою геофізики є комплексне дослідження кореляційних залежностей між фізичними параметрами різноманітних типів гірських порід. Встановлено наявність взаємозалежностей між електричними та магнітними характеристиками кристалічних порід Аргентинського архіпелагу. Найбільш достовірним виявився прямо-пропорційний взаємозв'язок між магнітною сприйнятливістю і діелектричною проникністю. Магнітна сприйнятливість також пов'язана прямою пропорційною залежністю з залишковою намагніченістю досліджених порід. Виявлено вплив густини на зміни деяких електричних і магнітних параметрів. Варіації електричних і магнітних характеристик та їх взаємозалежності визначаються петрохімічними й генетичними особливостями мінералів рудної фракції.

**Magnetic and electrical properties connections for the Argentines archipelago islands rocks.**

**S.I. Shepel**, B.Ya.

Savenko, M.V. Kravchuck.

**Abstract.** The investigation of connections of physical parameters of rocks is important geophysical problem. The existence of relations between electrical and magnetic parameters of crystalline rocks of the Argentines archipelago was determined. Correlation dependences are more distinct for relation between magnetic susceptibility and dielectric constant. Direct proportionality between magnetic susceptibility and remanent magnetization was fixed. The density influence on changes of some electrical and magnetic parameters were determined. Electrical and magnetic parameters variations and their relation are depended on petrochemistry and genetic features of ore minerals.

**Key words:** Argentines archipelago, relations, electric parameters, magnetic parameters, rocks.

### 1. Введение

При комплексном изучении глубинного строения литосферы различными методами геофизики важное значение приобретают не только результаты лабораторного изучения физических свойств горных пород и минералов в соответствующих модельных термобарических режимах опытов, но и материалы всесторонних исследований корреляционных зависимостей между физическими параметрами различных типов пород, что является одной из важных проблем петрофизики.

Настоящая работа – продолжение начатых ранее исследований комплекса физических характеристик кристаллических пород, отобранных авторами в районе украинской антарктической станции Академик Вернадский во время нескольких антарктических экспедиций. В результате проведенных работ установлен ряд характерных особенностей состава и распределения упругих, магнитных, теплофизических и электрических свойств пород, продиктованных условиями генезиса. Выявлено, что мелкозернистая минеральная масса, занимающая большую часть объема породы, определяет пониженные значения скоростей упругих волн по сравнению с типичными континентальными разновидностями. Пониженные значения удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ) изученных антарктических пород связываются с воздействием значительного количества флюидных включений в их составе. По магнитным характеристикам исследованные минеральные типы относятся к образованиям невысокой намагниченности с незначительным количеством сильно магнитных разновидностей. Установлена также слабая дифференцированность средних значений коэффициентов теплопроводности для разных групп пород при значительной их вариабельности в пределах каждой группы пород [Шепель и др., 1998; Шепель, 2002; Лебедев и др., 2002; Буртный и др., 2003; Савенко и др., 2005]. В статье [Корчин и др., 2004] зафиксирована достоверная взаимосвязь скоростей упругих волн и плотности ( $\sigma$ ) этих минеральных образований, которая может быть использована для построения глубинных вещественно-структурных моделей региона. Отмечены существенное отличие пород Антарктического

полуострова от аналогичных пород Крыма и Карпат и их подобие породам Японии и Гавайских островов. В [Шепель и др., 2004] приведены результаты исследований температурных изменений электрических свойств пород этого региона в температурном поле до 900°C, проанализированы закономерности и особенности влияния температуры на удельное электрическое сопротивление, относительную диэлектрическую проницаемость ( $\epsilon$ ).

## 2. Результаты

Накопленный большой фактический материал по петрофизическим характеристикам кристаллических пород западного побережья Антарктического полуострова и прилегающих островов Аргентинского архипелага позволил выполнить корреляционный анализ взаимосвязей электрических и магнитных свойств при различных значениях влажности образцов. В таблице для полученных корреляционных зависимостей приведены количество образцов ( $n$ ), коэффициенты корреляции ( $r$ ), коэффициенты  $a$  и  $b$  в линейных уравнениях регрессии ( $y = ax + b$ ), критерий Романовского ( $k$ ). Последний параметр ( $k = |r| \cdot (n-1)^{1/2}$  в случае, когда он больше или равен 3, свидетельствует о большой степени достоверности корреляционных связей.

Таблица. Числовые характеристики исследованных корреляционных зависимостей

Зависимости	n	Сухие				Воздушно-сухие			
		r	a	b	k	r	a	b	k
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\chi = F(\lg \rho_{\perp})$	37	-0,42	-9,85	116	2,52	-0,32	-15,4	114	1,92
$\chi = F(\lg \rho_{\parallel})$	37	-0,45	-20,7	182	2,70	-0,34	-18,8	135	2,04
$I_n = F(\chi)$	47	-	-	-	-	0,89	4,67	-66,0	6,03
$\chi = F(\epsilon_7)$	37	0,79	6,27	-38,5	4,74	0,54	2,77	-8,36	3,24
$\chi = F(\epsilon_1)$	37	0,50	0,74	17,6	3,0	0,48	0,38	12,7	2,88
$\chi = F(\epsilon^{11})$	35	-0,35	-0,04	46,9	2,04	-0,34	-0,009	58,4	1,98
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\chi = F(\sigma)$ (весь диапазон $\sigma$ )	44	-	-	-	-	0,50	119	-298	3,28
$\chi = F(\sigma)$ ( $\sigma > 2,8$ г/см <sup>3</sup> )	16	-	-	-	-	0,71	686	-1928	2,75
$I_n = F(\sigma)$ (весь диапазон $\sigma$ )	44	-	-	-	-	0,53	741	-1973	3,48
$I_n = F(\sigma)$ ( $\sigma > 2,8$ г/см <sup>3</sup> )	17	-	-	-	-	0,75	4159	-11662	3,01
$\epsilon_7 = F(\sigma)$	47	0,62	20,8	-45,2	4,26	0,60	32,5	-73,3	4,07
$\epsilon_1 = F(\sigma)$	46	0,47	450	-1128	3,15	0,37	233	-591	2,48
$\epsilon^{11} = F(\sigma)$	45	0,33	777	-2030	2,21	0,43	2752	-7008	2,85

Как видно из таблицы, для пород жильного и изверженного комплексов между магнитной восприимчивостью ( $\chi$ ) и удельным электрическим сопротивлением, измеренным на постоянном ( $\rho_{\perp}$ ) и переменном (1 кГц) токе ( $\rho_{\parallel}$ ), установлена обратная пропорциональная зависимость. При увеличении электросопротивления (постоянный ток) примерно на 5 порядков, а  $\rho$  (переменный) на 2,5 порядка, фиксируется уменьшение магнитной восприимчивости от  $80 \cdot 10^{-5}$  до  $30 \cdot 10^{-5}$  ед. СИ. Коэффициент корреляции между  $\lg \rho$  и  $\chi$  несколько больше при измерениях электросопротивления на переменном токе (-0,45) по сравнению с зависимостью, в которой используется  $\rho$ , измеренное на постоянном токе, несмотря на более широкий диапазон изменений данного параметра в первом случае. Заметно выше  $r$  и  $k$  зависимостей  $\chi = F(\rho)$ , полученные для сухих образцов. В качестве примера на рис.1 приведена эта связь для сухих жильных и изверженных пород района антарктической станции Академик Вернадский.

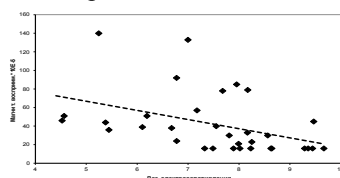


Рис. 1. Зависимость магнитной восприимчивости от электросопротивления (постоянный ток) сухих жильных и изверженных пород района станции Академик Вернадский.

Установленный обратно пропорциональный характер зависимости между удельным электрическим сопротивлением и магнитной восприимчивостью обусловлен, вероятно, изменением концентрации ферромагнитных минералов. Эти минералы являются полупроводниками, т.е. образованиями с повышенной по сравнению с основными породообразующими минералами электропроводностью. Уменьшение количества таких минералов в составе пород вызывает увеличение электросопротивления и снижение магнитной восприимчивости. Для вулканических пород отсутствует какая-либо закономерность в зависимости  $\chi=F(\rho)$ . Исследованные комплексы кристаллических образований характеризуются также отсутствием заметных связей между их намагниченностью и электрическими параметрами. Рис.2 иллюстрирует наличие сильной ( $r=0,89$ ,  $k=6,03$ ) прямо пропорциональной зависимости  $\chi$  и намагниченности для всех исследованных комплексов пород (жильные, интрузивные, вулканические). Хотя она четко обусловлена концентрацией магнитных минералов, однако по-разному зависит от их состава и генезиса. Здесь, особенно на величину  $I_n$ , кроме концентрации ферромагнетика в значительной мере влияют другие причины, связанные с геологической предысторией жизни.

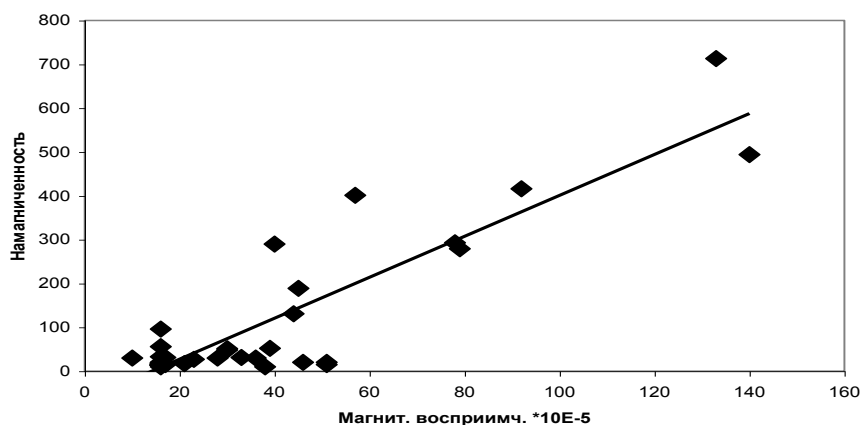


Рис. 2. Зависимость намагниченности ( $I_n$ ) пород района станции Академик Вернадский от магнитной восприимчивости ( $\chi$ ).

Магнитная восприимчивость описывается более тесной связью с диэлектрической проницаемостью ( $r = 0,48 - -0,79$ ;  $k = 2,88 - 4,74$ ) по сравнению с зависимостями  $\chi=F(\rho)$ ; ( $r = -0,32 - -0,45$ ;  $k = 1,92 - 2,70$ ). В качестве примера на рис. 3 приведена связь диэлектри-

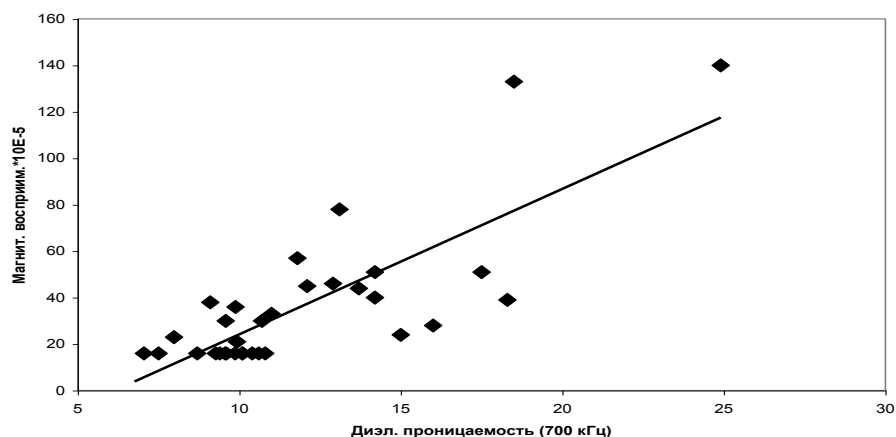


Рис. 3. Зависимость магнитной восприимчивости от диэлектрической проницаемости (700 кГц) сухих жильных и изверженных пород.

ческой проницаемости, измеренной на частоте 700 кГц ( $\epsilon_7$ ), сухих жильных и изверженных пород с магнитной восприимчивостью. Как видно из таблицы и рис. 3, выявлена достаточно достоверная прямая пропорциональная зависимость между магнитной восприимчивостью и диэлектрической проницаемостью. Это свидетельствует о том, что  $\epsilon$ , как и  $\chi$ , являются параметрами более чувствительными к концентрации ферромагнитных минералов по сравнению с электрическим сопротивлением. Наиболее слабо с магнитной восприимчивостью связан коэффициент потерь ( $\epsilon^{11}$ ).

Коэффициенты корреляции в обратно-пропорциональной зависимости между этими параметрами составляют  $-0,35$  (сухие породы) и  $-0,34$  (воздушно-сухие), а критерий Романовского – соответственно 2,04 и 1,48. Рассчитан также коэффициент множественной корреляции зависимости  $\chi=F(\rho; \epsilon_7)$ , который составил 0,21.

Влияние плотности ( $\sigma$ ) на магнитные и электрические параметры кристаллических пород островов Аргентинского архипелага представлено в таблице, а некоторые из этих зависимостей – на рис.4, 5. С

увеличением плотности примерно от 2,6 до 2,94 г/см<sup>3</sup> наблюдается рост магнитной восприимчивости, естественной остаточной намагниченности, диэлектрической проницаемости, коэффициента потерь при разной силе корреляционной связи. Коэффициенты корреляции в этих зависимостях изменяются от 0,33 [ $\varepsilon^{11}=F(\sigma)$ ] до 0,75 [ $I_n=F(\sigma)$ ], критерий Романовского – от 2,75 до 4,25. Такие значения  $r$  и  $k$  свидетельствуют о существенном влиянии плотности на  $\chi$ ,  $I_n$ ,  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon^{11}$ . Для сухих и воздушно-сухих пород в зависимостях диэлектрической проницаемости, измеренной на частоте 1 кГц ( $\varepsilon_1$ ), от плотности более надежными являются корреляционные взаимосвязи, рассчитанные по степенным уравнениям. В первом случае коэффициент корреляции равняется 0,45, критерий Романовского – 3,02, уравнение аппроксимирующей кривой имеет вид:  $\varepsilon_1=0,0003*\sigma^{11,5}$ , а для воздушно-сухих пород соответственно 0,53; 3,56 и  $\varepsilon_1=0,001*\sigma^{11,3}$ . Более достоверные связи плотности и диэлектрической проницаемости зафиксированы для сухих пород по сравнению с воздушно-сухими. Таким образом, наличие даже незначительного количества влаги в составе пород снижает степень влияния плотности на диэлектрическую проницаемость.

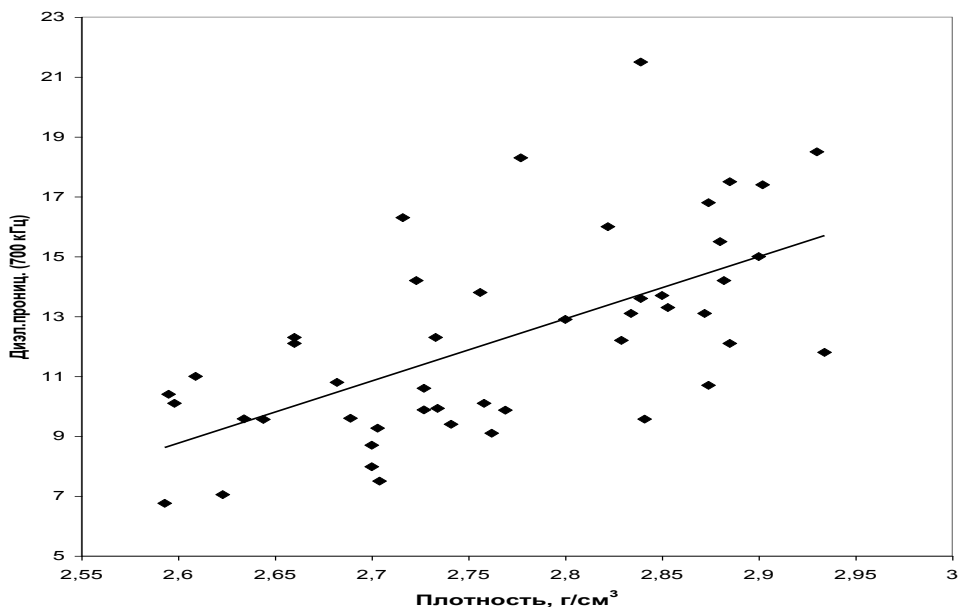


Рис. 4. Зависимость  $\varepsilon_1$  сухих пород района станции Академик Вернадский от плотности.

Во взаимосвязях магнитных параметров исследованных типов пород и плотности можно выделить два диапазона  $\sigma$  с различной силой связи этих параметров (таблица). В интервале более 2,8 г/см<sup>3</sup> установлены наиболее высокие  $r$  (0,71; 0,72) и достаточно значимые  $k$  (несмотря на относительное малое количество образцов) для графиков  $\chi, I_n=F(\sigma)$ . В области менее 2,8 г/см<sup>3</sup> корреляция между магнитными характеристиками и плотностью практически нулевая. Также отсутствие каких-либо взаимосвязей зафиксировано между плотностью и удельным электрическим сопротивлением, тангенсом угла диэлектрических потерь.

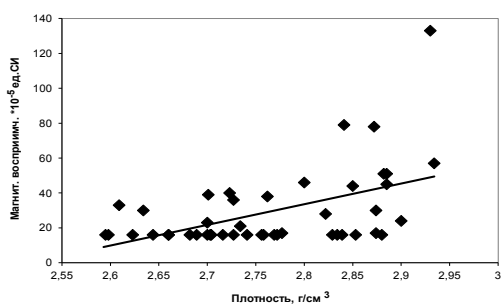


Рис. 5. Зависимость  $\chi$  гранитов района станции Академик Вернадский от плотности.

### 3. Анализ результатов

Вариации значений физических параметров образцов зависят не только от состава и кристаллической структуры, но и от общего комплекса факторов реального состояния горной породы, причем от последних больше, чем от первых. Хотя основным фактором, определяющим их изменения, является концентрация магнитных минералов в породе, существуют определенные закономерности распределения и генетические связи этих минералов с типом породы и структурой, с условиями их формирования и изменений. Зарождение, рост, преобразование магнитных минералов происходят в геомагнитном поле, что приводит к образованию намагниченности, свойства которой зависят от условий ее возникновения. Она обусловлена наличием рассеянных и часто не связанных друг с другом зерен ферромагнитных минералов. Они могут быть различными по форме, химическому составу и механическим свойствам или представлять системы, состоящие из немагнитных минералов, отличающихся по свойствам и содержанию ферромагнитных включений. Как и другие магниточувствительные характеристики (например, коэрцитивная сила), намагниченность связана с внутренним напряжением и обуславливает равновесное энергетическое состояние ферромагнетика. Большую роль играют вторичные явления и связанные с ними химические превращения ферромагнитного вещества, такие как хлоритизация, низко- и высокотемпературное окисление и некоторые другие. Процессам хлоритизации чаще подвержены породы основного и реже среднего и кислого состава. Для минеральных образований изучаемого региона наиболее характерно преобразование их под воздействием гидротермальных растворов, которое проявляется на небольших площадях в виде узких полос, приуроченных к зонам нарушений. Для вулканогенных пород вторичные изменения ферромагнитных минералов (низко- и высокотемпературное окисление) возможны с прогревом нижних слоев горизонтов эффузивной толщи под действием мощных покровов свежих лав, излившихся на ее поверхность, с образованием новых вулканических жерл и обилием даек.

Отмеченные различия в распределении электрических и магнитных комплексов пород коррелируются также петрохимическими и генетическими особенностями минералов рудной фракции. Различная форма зерен рудного минерала в шлифах свидетельствует о том, что во всех трех комплексах он, вероятно, образовывался на различных этапах формирования пород. В большинстве образцов присутствуют неправильные, округлые и угловатые формы зерен рудного минерала. Хорошая ограниченность кристаллов в породах может свидетельствовать о более раннем образовании рудного минерала по сравнению с другими минералами в породе. Округлая же форма рудных зерен может быть результатом процесса резорбции, т.е. обратного растворения их в магме. Это возможно, во-первых, при изменении внешних РТ-условий или изменении состава магмы (например, при захвате магмой других по составу пород и т.д.), и, во-вторых, резорбция может наступить тогда, когда при определенной температуре и на определенной стадии кристаллизации уже выделившийся минерал делается неустойчивым в растворе и начинает растворяться в нем. В результате дальнейшей перекристаллизации породы рудный минерал замещает ранее образованные минералы, такие как биотит и амфибол, и является вторичным, находясь в парагенезисе с другими минералами, например, с хлоритом и эпидотом в нашем случае. Явление резорбции более характерно для вулканического и жильного комплексов. Данные петромагнитного анализа минералов рудной фракции также указывают на вероятность образования и существования в породах по крайней мере нескольких видов ферромагнетиков: одни – зерна, образовавшиеся на ранней стадии минерализации, другие – являющиеся продуктом вторичных изменений породы, и, наконец, связанные, по-видимому, с процессом собирательной перекристаллизации рудного вещества. Следует отметить, что эти процессы затрагивают все три комплекса пород, что может свидетельствовать о подобию термобарических режимов рудной минерализации в разных геологических структурах района. Это является определяющим фактором полученного распределения и взаимосвязей электрических и магнитных характеристик пород региона.

### 4. Выводы

Исследован характер корреляционных зависимостей между магнитными (магнитная восприимчивость, естественная остаточная намагниченность) и электрическими (удельное электрическое сопротивление, относительная диэлектрическая проницаемость, коэффициент потерь) свойствами кристаллических пород района станции Академик Вернадский. Установлены наличие определенных связей между магнитной восприимчивостью и электрическими параметрами и отсутствие зависимостей между намагниченностью и электрическими свойствами. Наиболее сильная связь с высокими значениями коэффициентов корреляции и критериями Романовского зафиксирована в прямо пропорциональных зависимостях магнитной восприимчивости и диэлектрической проницаемости при разных значениях влажности и частоты электромагнитного поля. Получена прямо пропорциональная зависимость значений магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности изученных пород. Вариации значений электрических и магнитных характеристик их взаимосвязи коррелируются также с петрохимическими и генетическими особенностями минералов рудной фракции.

## Литература

**Буртний П.А.**, Карнаухова Е.Е., Корчин В.А. и др. Физические характеристики магматических пород района антарктической станции Академик Вернадский // Украинский антарктический журнал. – 2003. – №1. – С.47–53.

**Корчин В.А.**, Буртний П.А., Карнаухова Е.Е. и др. Упруго-плотностные характеристики горных пород западного побережья Антарктического полуострова района станции Академик Вернадский // Украинский антарктический журнал. – 2004. – №2. – С.66–72.

**Лебедев Т.С.**, Шепель С.И., Корчин В.А. и др. Петрофизические характеристики горных пород западного побережья Антарктического полуострова и прилегающих островов в районе станции Академик Вернадский // Геофизический журнал. – 2002. – Т. 24, №6. – С.93–115.

**Савенко Б.Я.**, Шепель С.И., Буртний П.А. и др. Анализ петромагнитных характеристик горных пород Антарктического побережья района станции Академик Вернадский // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2005. – №2. – С.101–110.

**Шепель С.И.**, Буртний П.А., Корчин В.А. и др. Физические свойства пород района станции Академик Вернадский // Бюлетень Українського Антарктичного центру. – 1998. – Вып.2. – С. 85–90.

**Шепель С.И.** Электрические свойства магматических пород района станции Академик Вернадский // Бюлетень Українського Антарктичного центру. – 2002. – Вып.4 – С. 76–82.

**Шепель С.И.**, Буртний П.А., Карнаухова Е.Е. Температурные изменения электрических свойств магматических пород района станции Академик Вернадский // Украинский антарктический журнал. – 2004. – №2. – С. 44–50.