

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ СПЕКТРАЛЬНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ СТРУКТУР С ГАРМОНИКАМИ ИОНОСФЕРНОГО АЛЬФВЕНОВСКОГО РЕЗОНАТОРА

RESEARCH INTO CONNECTION BETWEEN SPECTRAL RESONANCE STRUCTURES AND HARMONICS OF IONOSPHERIC ALFVÉN RESONATOR

К. Прикнер[†]

Геофизический институт АН ЧР, Прага, Чешская Республика

Ф.З. Фейгин

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, feygin@ifz.ru*

Ю.Г. Хабазин

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, khabazin@ifz.ru*

K. Prikner[†]

Institute of Geophysics CAS, Prague, Czech Republic

F.Z. Feygin

*O.Yu. Schmidt Institute of Physics of Earth RAS
Moscow, Russia, feygin@ifz.ru*

Yu.G. Khabazin

*O.Yu. Schmidt Institute of Physics of Earth RAS
Moscow, Russia, khabazin@ifz.ru*

Аннотация. Представлены результаты моделирования ионосферного альфвеновского резонатора (ИАР) и сравнение результатов прохождения электромагнитных волн через ИАР к земной поверхности с динамическим спектром одновременных наблюдений спектральных резонансных структур (СРС). Для моделирования ИАР были использованы параметры ионосферы, полученные по измерениям программы CP-1 скандинавского радара EISCAT. На основе построенной модели ИАР были вычислены коэффициенты отражения $RC(f)$ и прохождения $TC(f)$ электромагнитных волн в частотной области 0–5 Гц. Наблюдаемые динамические спектрограммы СРС состоят из спектральных линий, у которых уверенно определяются частоты, временные вариации частот и расстояния между соседними резонансными линиями. Вычисленные частоты максимумов коэффициента прохождения сигналов TC к земной поверхности соответствуют наблюдаемым частотам динамического спектра СРС.

Ключевые слова: ионосферный альфвеновский резонатор, коэффициенты отражения и прохождения, динамические спектры, спектральные резонансные структуры.

Abstract. We present the results of modeling of the ionospheric Alfvén resonator (IAR) and compare the results of electromagnetic waves passing through IAR to Earth's surface with the dynamic spectrum of simultaneous observations of spectral resonance structures (SRS). IAR is simulated using ionospheric parameters obtained from measurements made with the CP-1 program of the Scandinavian EISCAT radar. The IAR model is employed to calculate coefficients of reflection $RC(f)$ and transmission $TC(f)$ of electromagnetic waves in the frequency range 0–5 Hz. The observed dynamic SRS spectrograms consist of spectral lines, in which frequencies, time variations of frequencies, and distances between adjacent resonant lines are confidently determined. The calculated frequencies of maxima of the signal transmission coefficient TC to Earth's surface correspond to the observed frequencies of the dynamic spectrum of SRS.

Keywords: ionospheric Alfvén resonator, reflection and transmission coefficients, dynamic spectra, spectral resonance structures.

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные исследования спектральных резонансных структур (СРС) связывают их появление на Земле с влиянием ионосферного альфвеновского резонатора (ИАР) [Pokhotelov et al., 2001] на прохождение альфвеновских волн в частотном диапазоне от долей до нескольких герц через ионосферу Земли. Первые экспериментальные исследования СРС были проведены на среднеширотной станции вблизи Нижнего Новгорода и на высокоширотной станции Кильписъярви (Kilpisjärvi, Финляндия, $L=6$) [Belyaev et al., 1989, 1990]. Типичные СРС показаны на рис. 1 [Pokhotelov et al., 2003]. Проводились исследования СРС на высоких широтах [Yahnin et al., 2003; Pokhotelov et al.,

2003]. В работе [Гульельми, Потапов, 2017] показана связь появления СРС в обл. Монды с солнечным ветром. Кроме наблюдений на земной поверхности, были проведены наблюдения СРС на спутниках FREJA и FAST [Grzesiak, 2000; Chaston et al., 2002]. При исследовании связи СРС на земной поверхности с влиянием ИАР модель ионосферы строилась на основе известных численных моделей ионосферы и реальных ионосферных параметров, полученных с использованием ионозондов [Belyaev et al., 1999; Семенова, Яхнин, 2014]. В нашей работе для построения модели ионосферы были использованы реальные данные по ионосферной плазме, измеренные с помощью программы CP-1 скандинавского радара EISCAT, расположенного

Статья посвящается памяти известного чешского геофизика доктора Карела Прикнера и основана на неопубликованных ранее результатах, полученных К. Прикнером совместно с соавторами.

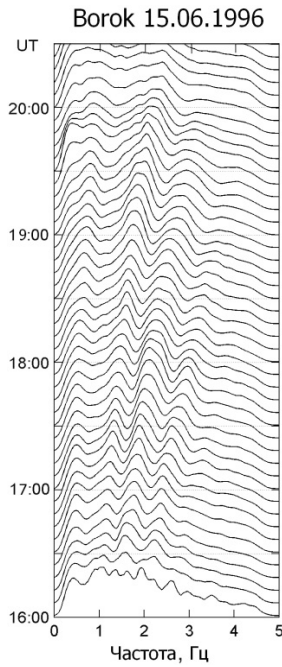


Рис. 1. Типичный динамический спектр СРС, зарегистрированный в обс. Борок 15.09.1996 г.

вблизи ст. Кильписъярви, на которой одновременно наблюдались СРС. Цель нашей работы состояла в количественном описании спектров СРС, возникающих при прохождении электромагнитных волн в частотном диапазоне 0–5 Гц через ионосферу к земной поверхности под влиянием альфвеновского резонатора.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ, ОСНОВАННОГО НА ДАННЫХ ВЕРТИКАЛЬНОГО ИОНОСФЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СКАНДИНАВСКИМ РАДАРом EISCAT

Для исследования динамического спектра СРС мы используем метод численного моделирования, подробно описанный в работах [Prikner, Vagner, 1983, 1991]. Этот метод применялся также для объяснения формирования спектров геомагнитных пульсаций [Prikner et al., 2000; Mursula et al., 2000]. Для анализа был выбран интервал динамического спектра СРС 19:30–20:30 UT 21 сентября 1998 г., наблюдавшегося на геофизической станции Кильписъярви

$$\Phi=69.02^\circ \text{ N}, \lambda=20.86^\circ \text{ E}, L=5.9.$$

Указанный интервал динамического спектра показан на рис. 2. Для этого временного интервала имеются результаты измерения вертикального профиля ионосферных плазменных параметров, полученные программой CP-1 радара EISCAT. Применяемый метод численного моделирования дает возможность получить значения частот сигналов ИАР, а также значения \mathbf{E} и \mathbf{B} электрических и магнитных волновых полей как на земной поверхности, так и на любом высотном уровне ИАР. Для моделирования распространения волн в ионосферном альфвеновском резонаторе

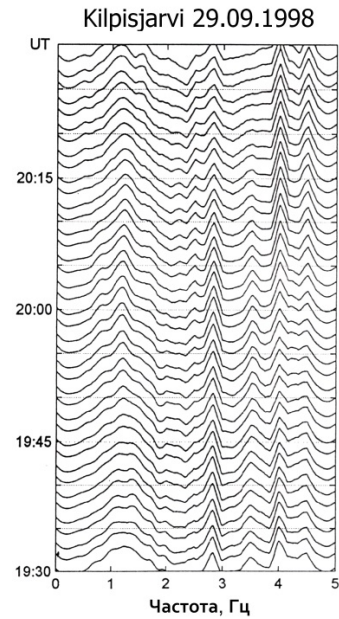


Рис. 2. Интервал динамического спектра СРС 19.30–20.30 UT 21 сентября 1998 г., наблюдавшегося на геофизической станции Кильписъярви (Финляндия).

была выбрана однородная плоская альфвеновская волна частоты f с волновым вектором \mathbf{k} , падающая на ионосферную стратифицированную магнитоактивную среду с внешним геомагнитным полем \mathbf{B}_E . Предполагается, что $\mathbf{k} \parallel \mathbf{B}_E$. При таком выборе направления распространения альфвеновская волна представляет собой левополяризованную L-моду. Основными исходными параметрами при моделировании ионосферной среды служили реально наблюдаемые радаром EISCAT высотные профили электронно-ионной плотности квазинейтральной ионосферы $N_e(z)$, профили эффективной ионной массы полного состава плазмы и профили эффективных ионных и электронных столкновений [Prikner et al., 2001]. При моделировании вычислялись амплитуды полного волнового поля (\mathbf{E}, \mathbf{B}) . В результате были определены величины коэффициентов прохождения и отражения, которые являются важными характеристиками ИАР.

Коэффициент прохождения (TC) на частоте f у земной поверхности определяется по горизонтальным компонентам амплитуды волнового поля B :

$$TC(f) = B_h(f, z=0) / B_h^{inc}(f, z_{max}), \quad (1)$$

где B_h — горизонтальная компонента волны, прошедшей на поверхность, B_h^{inc} — горизонтальная компонента амплитуды волны, падающей на ионосферу.

Коэффициент отражения RC на верхней границе ионосферы $z=z_{max}$ (предполагаемой верхней границе ИАР)

$$RC(f) = B_h^{refl}(f, z_{max}) / B_h^{inc}(f, z_{max}), \quad (2)$$

где B_h^{refl} — горизонтальная компонента амплитуды волны, отраженной в магнитосферу, на высоте $z=z_{max}$. Для реального ИАР верхняя граница определяется резким градиентом альфвеновской скорости

V_A , зависящей от плотности ионов, и может быть выбрана равной $z_{\max} = 2000$ км. Из уравнений (1) и (2) следует, что TC и RC — это горизонтальные амплитуды, нормированные на амплитуду падающей волны.

Программа EISCAT CP-1 измеряет вертикальные профили ионосферных плазменных параметров над Tromsø (Norway, $\varphi = 69.66^\circ$ N, $\lambda = 18.95^\circ$ E) вблизи ст. Кильписьярви. Измерения программой EISCAT CP-1 проводились только до высоты $z_1 = 600$ км, поэтому для построения ИАР до высоты $z_{\max} = 2000$ км, данные EISCAT CP-1 были дополнены соответствующими данными модели ионосферы IRI-95. В соответствии с этой моделью спад плотности ионосферной плазмы близок к экспоненциальному, поэтому была выбрана аппроксимация распределения плотности в виде

$$N_e(z) = N_e(z_1) 10^{-a(z-z_1)}$$

с показателем $a = 1.95 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1}$.

На рис. 3, а показаны высотные профили ионной (маркированная линия) и электронной (сплошная линия) эффективных частот столкновений. На высотах выше уровня $z > 600$ км, достигаемого радаром EISCAT, эффективные частоты построены на основе высотных профилей электронной и ионной плотностей и температуры модели IRI. На рис. 3, б показан высотный профиль предполагаемой эффективной ионной массы в единицах массы протона,

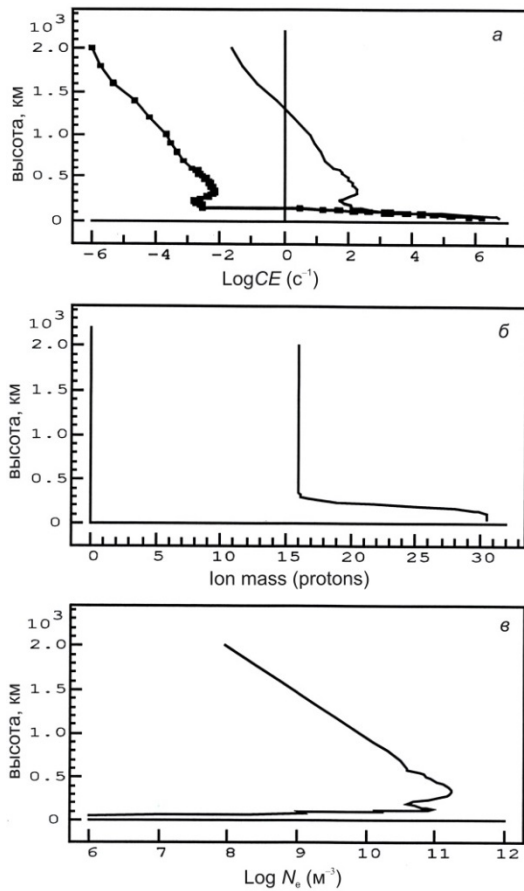


Рис. 3. Высотные профили ионной (маркированная линия) и электронной (сплошная линия) эффективных частот столкновений (а); эффективной ионной массы в единицах массы протона (б); электронно-ионной плотности (в) вплоть до $z_{\max} = 2000$ км (район Кильписьярви, 20:00 UT 21 сентября 1998 г.)

на рис. 3, в — вертикальный профиль электронно-ионной плотности до $z_{\max} = 2000$ км, соответствующий району Кильписьярви в 20:00 UT 21 сентября 1998 г.

С помощью указанных профилей были вычислены $TC(f)$ и $RC(f)$ в диапазоне частот 0–5 Гц. На верхней границе области ИАР при $z_{\max} = 2000$ км предполагалось падение альфвеновской волны на ионосферу с наклоном внешнего магнитного поля под углом $I = 77^\circ$ к ионосфере, что соответствует условиям ст. Кильписьярви. На рис. 4, а, б показаны результаты численной модели — частотные зависимости $RC(f)$ и $TC(f)$ соответственно. Эти нормированные кривые горизонтальной амплитуды демонстрируют явно выраженные ряды гармоник выше фундаментальной частоты ИАР $f_0 \sim 0.3$ Гц; минимумы RC совпадают с максимумами TC . Отметим, что $RC < 1$ для всех частот, тогда как $TC(f)$ может принимать любые значения из-за возможного резонансного усиления сигнала в ионосферном альфвеновском резонаторе [Priikner, Vagner, 1990].

На рис. 4 видна серия высших гармоник на частотах 0.75, 1.30, 1.75, 2.25, 2.70, 3.15, 3.60, 4.00 и 4.45 Гц. Большая их часть видна на рис. 2, представляющем динамический CPC-спектр сигнала на ст. Кильписьярви. Здесь максимумы спектров мощности сигналов расположены на частотах 0.7, 1.2, 1.7, 2.4, 2.8, 3.3, 3.7, 4.1, и 4.5 Гц. Они близко соответствуют максимумам CPC, которые, по всей вероятности, являются результатом воздействия ИАР на исходный шумовой электромагнитный сигнал, распространяющийся вниз к ионосфере из отдаленных районов магнитосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты исследования спектральных резонансных структур в частотной области 0–5 Гц, обусловленных ионосферным альфвеновским резонатором. Близость результатов числен-

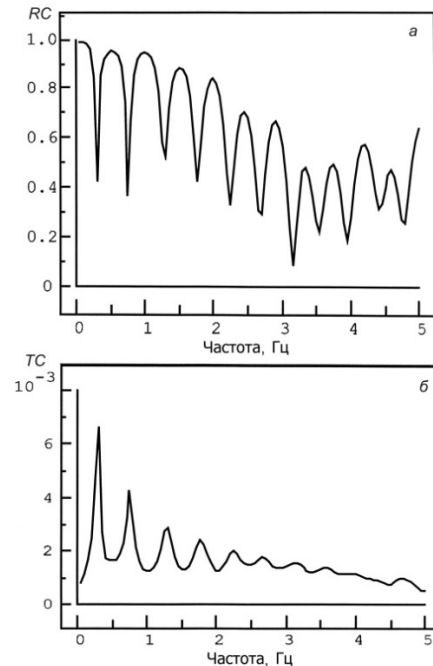


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициентов отражения $RC(f)$ (а) и прохождения $TC(f)$ (б) в 20:00 UT 21 сентября 1998 г.

ного моделирования ионосферной фильтрации, основанного на данных радара EISCAT, и одно-временного наблюдения СРС на ст. Кильписъярви 21 сентября 1998 г. позволяют сделать вывод, что наблюдаемые СРС являются прямым следствием прохождения магнитосферного электромагнитного шума в частотном диапазоне 0–5 Гц через фильтр ионосферного альфвеновского резонатора.

Работа выполнена при поддержке гранта Программы Президиума РАН № 28 и государственного задания ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гульельми А.В., Потапов А.С. Влияние межпланетного магнитного поля на УНЧ-колебания ионосферного резонатора // *Космические иссл.* 2017. Т. 55, № 4. С. 263–267.

Семенова Н.В., А.Г. Яхнин. Резкое изменение резонансной структуры в спектре электромагнитного шума в герцовом диапазоне во время суббури // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 2014. Т. 54. С. 341–347.

Belyaev P.P., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Trakhtengertz V.Y. Experimental studies of resonance structure in the spectrum of atmospheric electromagnetic background noise in the range of short-period geomagnetic pulsations // *Radio-physics and Quantum Electronics.* 1989. V. 32. P. 491–498.

Belyaev P.P., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Trakhtengertz V.Y. The ionospheric Alfvén resonator // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1990. V. 52. P. 781–788.

Belyaev P.P., Bosinger T., Isaev S.V., Kangas J. First evidence at high latitudes for the ionospheric Alfvén resonator // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 4305–4317.

Chaston C.C., Bonell J.W., Carlson C.V., et al. Electron acceleration in the ionospheric Alfvén resonator // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. DOI: [1029/2002JA009272](https://doi.org/10.1029/2002JA009272).

Grzesiak M. Ionospheric Alfvén Resonator // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. P. 923–926.

Mursula K., Prikner K., Feygin F.Z., et al. Non-stationary Alfvén resonator: new results on Pc1 pearls and IPDP events // *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2000. V. 62. P. 299–309.

Pokhotelov O.A., Khruschev V., Parrot V., et al. Ionospheric Alfvén resonator revisited. Feedback instability // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 25813–25824.

Pokhotelov O.A., Feygin F.Z., Khabazin Yu.G., et al. Observations of IAR spectral resonance structures at a large triangle of geophysical observatories // *Proc. XXVI Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”.* Apatity, 2003. P. 123–126.

Prikner K., Vagner V. Numerical modeling of the ionospheric filtration of an ULF micropulsation signal // *Studia Geophysica et Geodaetica.* 1983. V. 27. P. 173–190.

Prikner K., Vagner V. The ionosphere as an Alfvén resonator in the Pc1 micropulsation range // *Studia Geophysica et Geodaetica.* 1990. V. 34. P. 342–361.

Prikner K., Vagner, V. Numerical solution to the problem of ionospheric filtration of ULF waves in the Pc1 range. The total wave field inside the ionospheric transition layer // *Studia Geophysica et Geodaetica.* 1991. V. 35. P. 90–99.

Prikner K., Mursula K., Feygin F.Z., et al. Non-stationary Alfvén resonator: vertical profiles of wave characteristics // *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2000. V. 62. P. 311–322.

Prikner, K., Mursula K., Kangas J., Feygin F.Z. Ionospheric Alfvén resonator control over the frequency-variable Pc1 event in Finland on May 14, 1997 // *Studia Geophysica et Geodaetica.* 2001. V. 45. P. 363–381.

Yahnin A.G., Semenova N.V., Ostapenko A.A., et al. Morphology of the spectral resonance structure of the electromagnetic background noise in the range of 0.1–4 Hz at L=5.2 // *Ann. Geophys.* 2003. V. 21. P. 779–786.

REFERENCES

Belyaev P.P., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Trakhtengertz V.Y. Experimental studies of resonance structure in the spectrum of atmospheric electromagnetic background noise in the range of short-period geomagnetic pulsations. *Radio-physics and Quantum Electronics.* 1989, vol. 32, pp. 491–498.

Belyaev P.P., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Trakhtengertz V.Y. The ionospheric Alfvén resonator. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1990, vol. 52, pp. 781–788.

Belyaev P.P., Bosinger T., Isaev S.V., Kangas J. First evidence at high latitudes for the ionospheric Alfvén resonator. *J. Geophys. Res.* 1999, vol. 104, pp. 4305–4317.

Chaston C.C., Bonell J.W., Carlson C.V., Berthomier M., Peticolas L.M., Roth I., McFadden J.P. Electron acceleration in the ionospheric Alfvén resonator. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107. DOI: [1029/2002JA009272](https://doi.org/10.1029/2002JA009272).

Grzesiak M. Ionospheric Alfvén resonator. *Geophys. Res. Lett.* 2000, vol. 27, pp. 923–926.

Guglielmi A.V., Potapov A.S. Interplanetary magnetic field effect on ULF oscillations of ionospheric resonator. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Res.]. 2017, vol. 55, no. 4, pp. 263–267. (In Russian).

Mursula K., Prikner K., Feygin F.Z., Braysy T., Kangas J., Kerttula R., Pollari P., Pikkarainen T., Pokhotelov O.A. Non-stationary Alfvén resonator: new results on Pc1 pearls and IPDP events. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2000, vol. 62, pp. 299–309.

Pokhotelov O.A., Khruschev V., Parrot V., Senchenkov S., Pavlenko V.P. Ionospheric Alfvén resonator revisited. Feedback instability. *J. Geophys. Res.* 2001, vol. 106, pp. 25813–25824.

Pokhotelov O.A., Feygin F.Z., Khabazin Yu.G., Khruschev V.V., Bosinger T., Kangas J., Prikner K. Observations of IAR spectral resonance structures at a large triangle of geophysical observatories. *Proc. XXVI Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”.* Apatity, 2003, pp. 123–126.

Prikner K., Vagner V. Numerical modeling of the ionospheric filtration of an ULF micropulsation signal. *Studia Geophysica et Geodaetica.* 1983, vol. 27, pp. 173–190.

Prikner K., Vagner V. The ionosphere as an Alfvén resonator in the Pc1 micropulsation range. *Studia Geophysica et Geodaetica.* 1990, vol. 34, pp. 342–361.

Prikner K., Vagner V. Numerical solution to the problem of ionospheric filtration of ULF waves in the Pc1 range. The total wave field inside the ionospheric transition layer. *Studia Geophysica et Geodaetica.* 1991, vol. 35, pp. 90–99.

Prikner K., Mursula K., Feygin F.Z., Kangas J., Kerttula R., Pikkarainen T., Pokhotelov O.A., Vagner V. Non-stationary Alfvén resonator: vertical profiles of wave characteristics. *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2000, vol. 62, pp. 311–322.

Prikner K., Mursula K., Kangas J., Feygin F.Z. Ionospheric Alfvén resonator control over the frequency-variable Pc1 event in Finland on May 14, 1997. *Studia Geophysica et Geodaetica.* 2001, vol. 45, pp. 363–381.

Semenova N.V., Yakhnin A.G. Abrupt change of resonance structure in electromagnetic noise spectrum in hertz range during a substorm. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2014, vol. 54, pp. 341–347. (In Russian).

Yahnin A.G., Semenova N.V., Ostapenko A.A., Kangas J., Manninen J., Turunen T. Morphology of the spectral resonance structure of the electromagnetic background noise in the range of 0.1–4 Hz at L=5.2. *Ann. Geophys.* 2003, vol. 21, pp. 779–786.

Как цитировать эту статью

Прикнер К., Фейгин Ф.З., Хабазин Ю.Г. Исследование связи спектральных резонансных структур с гармониками ионосферного альфвеновского резонатора. *Солнечно-земная физика.* 2018. Т. 4, № 3. С. 57–60. DOI: [10.12737/szf-43201806](https://doi.org/10.12737/szf-43201806).