

Е. В. Шмелев^{1,2}, Т. Н. Хацевич^{1,2}*

Стартовые системы для расчета инфракрасных двухдиапазонных объективов с двумя полями зрения

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Оптическое расчетное бюро, г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: shmelejev@luggar.biz

Аннотация. Современные направления в развитии тепловизионных приборов связаны с технической реализацией возможности анализа изображения одновременно в двух диапазонах спектра: 3–5 и 8–12 мкм путем применения двухдиапазонных (DWIR) приемников излучений, а также возможности проводить наблюдение изображений в системах с перестраиваемыми угловыми полями и, соответственно, масштабами изображений. Необходимость решения подобных задач требует от разработчиков инфракрасных объективов поиска новых схемных решений, в которые на начальном уровне закладывается абберационный потенциал как по возможности коррекции хроматизма в расширенном спектральном диапазоне, так и по сохранению этой коррекции при смещениях компонентов оптической схемы, необходимых для смены угловых полей. Цель статьи – предложить принцип построения стартовой системы DWIR объектива с двумя полями зрения, провести исследование хроматизма положения в ней и найти варианты с скорректированным хроматизмом. В работе используются методы геометрической оптики и теории хроматизма и аббераций третьих порядков. Результаты представлены в виде системы уравнений, которой должны удовлетворять параметры системы, и результатов ее численного решения. В выводах отмечается, что при переходе от стартовой системы к оптической системе с конечными толщинами и апертурами уровень хроматической коррекции, заложенный в стартовую систему, позволяет обеспечить качественное изображение в каждом из рабочих поддиапазонов без смещения плоскости изображения.

Ключевые слова: инфракрасный объектив, DWIR, дискретная смена, хроматизм положения

E. V. Shmelev^{1,2}, T. N. Khatsevich^{1,2}*

Starting Systems for Calculating Infrared Dual-Band Lenses with Two Fields of View

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

² Optical Design Office, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: shmelejev@luggar.biz

Abstract. Modern directions in the development of thermal imaging devices are associated with the technical implementation of the ability to analyze images simultaneously in two spectral ranges 3-5 and 8-12 microns through the use of dual-band (DWIR) radiation receivers, as well as the ability to observe images in systems with tunable angular fields and, respectively, by the scale of the images. The need to solve such problems requires developers of infrared lenses to search for new circuit solutions in which, at the starting level, the aberration potential is built into both the possibility of correcting chromatism in an expanded spectral range and maintaining this correction when the components of the optical circuit are displaced, necessary to change the fields angles. The purpose of

the article is to propose a principle for constructing a starting system for a DWIR lens with two fields of view, to conduct a study of the chromatism of the position in it and to find options with corrected chromatism. The work uses methods of geometric optics and the theory of chromatism and third-order aberrations. The results are presented in the form of a system of equations that the system parameters must satisfy, and the results of its numerical solution. The conclusions note that when moving from a start system to an optical system with finite thicknesses and apertures, the level of chromatic correction incorporated into the start system makes it possible to provide a high-quality image in each of the working subranges without shifting the image plane.

Keywords: infrared lens, DWIR, discrete change, position chromatism

Введение

К одному из основных трендов развития тепловизионной аппаратуры в настоящее время относится создание двухспектральных тепловизионных приборов, работающих одновременно в средневолновом (3–5 мкм) и длинноволновом (8–12 мкм) диапазонах спектра с использованием одного двухдиапазонного приемника излучений. Для обозначения таких приемников и систем используются аббревиатуры MWIR/LWIR или DWIR. В [1] отмечается, что «высокая информативность и достигаемая при этом компактность приборов – движущие силы развития этого направления». Как предполагается в указанном источнике, в следующем десятилетии DWIR приемники излучений станут коммерчески доступными изделиями инфракрасной фотоники.

Сопряжение объектива с приемником излучений должно базироваться на спектральном, геометрическом, энергетическом и абберационном соответствии. При разработке инфракрасных объективов для DWIR приемников излучений на первый план выходит необходимость обеспечения спектрального соответствия. Иными словами, первоочередной задачей при разработке DWIR объективов становится необходимость устранения хроматических aberrаций в широком спектральном диапазоне от 3 до 12 мкм.

Результаты разработок оптических систем, описанные в [3, 4], показывают, что задача создания объективов для DWIR приемников излучений при относительных отверстиях $1 : 3$ и менее может быть решена с использованием традиционных поверхностей в оптических системах, при этом в указанных источниках не приводятся обоснования оптимальности выбора используемых материалов.

Данная статья является продолжением ранее начатых исследований [5] и ориентирована на обоснование выбора материалов в инфракрасных двухдиапазонных объективах с дискретной сменой фокусного расстояния. Целью статьи является предложить схемное решение инфракрасного объектива с двухступенчатой сменой фокусного расстояния и для него представить результаты численного моделирования хроматизма. В качестве результата исследования представляется статистическая выборка оптических сил и материалов компонентов, которые могут использоваться для создания стартовых (исходных) систем в оптическом проектировании объективов. Как известно эффективность компьютерных методов оптимизации и проектирования оптических систем во многом определяется

абберационным потенциалом стартовых систем. Использование результатов направлено на создание стартовых систем с потенциалом ахроматизации в DWIR диапазоне.

Методы и материалы

Принципиальное схемное решение (рис. 1) базируется на афокальной системе с дискретной сменой фокусного расстояния, осуществляемой путем перемещения внутреннего компонента в два крайних положения, и фокусирующего компонента. При смене фокусного расстояния такое решение позволяет обеспечить постоянство относительного отверстия и заднего фокального отрезка.

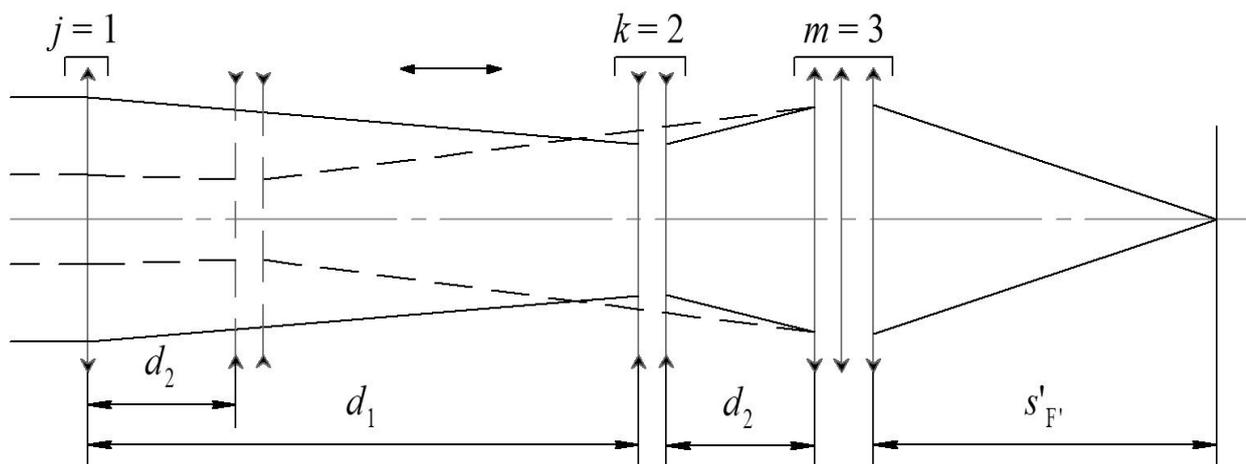


Рис. 1. Схемное решение для объектива с двухступенчатой сменой фокусного расстояния

Между оптическими силами φ_1 , φ_2 , φ_3 компонентов, расстояниями d_1 , d_2 между ними, перепадом z фокусных расстояний, задним фокальным отрезком объектива $s'_{F'}$ и наибольшим значением фокусного расстояния f'_1 в такой системе выполняются соотношения:

$$\begin{aligned} \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 - d_1\varphi_1\varphi_2 - (d_1 + d_2)\varphi_1\varphi_3 - d_2\varphi_2\varphi_3(1 - \varphi_1d_1) &= 1, \\ \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 - d_2\varphi_1\varphi_2 - (d_1 + d_2)\varphi_1\varphi_3 - d_1\varphi_2\varphi_3(1 - \varphi_1d_2) &= z, \\ \varphi_1 &= (1 - \sqrt{z}) / (d_2 - d_1\sqrt{z}), \quad \varphi_2 = (z - 1) / \sqrt{z}(d_2 - d_1), \quad s'_{F'} = f'_1 / \sqrt{z}. \end{aligned} \quad (1)$$

Выражения (1) приведены при нормировке $f'_1 = 1$.

Для описания хроматизма положения Δs_1 и Δs_2 для наибольшего и наименьшего фокусных расстояний объектива могут использоваться выражения:

$$\Delta s_1 = S_{1,j} + \left[1 - d_1 \sum_{i=1}^j \varphi_i \right]^2 S_{2,k} + \left[1 - \sum_{i=1}^j \varphi_i (d_1 + d_2) - d_2 \sum_{i=1}^k \varphi_i \left(1 - d_1 \sum_{i=1}^j \varphi_i \right) \right]^2 S_{3,m}, \quad (2)$$

$$\Delta s_2 = \frac{1}{z^2} \left[S_{1,j} + \left[1 - d_2 \sum_{i=1}^j \varphi_i \right]^2 S_{2,k} + \left[1 - d_2 \sum_{i=1}^j \varphi_i - d_1 \sum_{i=1}^j \varphi_i - d_1 \varphi_2 \left(1 - d_2 \sum_{i=1}^j \varphi_i \right) \right]^2 S_{3,m} \right],$$

где переменные $S_{1,j}$, $S_{2,k}$, $S_{3,m}$ определяются как суммы отношений оптических сил каждой линзы к их относительным средним дисперсиям для первого, второго и третьего компонента соответственно, а j , k , m – верхние границы суммирования, равные количеству линз в компоненте.

Поиск области решений основан на решении системы уравнений, включающей приравненные к нулю выражения (2), записанные для каждого из спектральных диапазонов MWIR и LWIR, и соотношения (1).

Результаты и обсуждение

Численными методами для 12 материалов, прозрачных в MWIR и LWIR диапазонах, с учетом ограничений, накладываемых габаритными соображениями и относительными отверстиями компонентов, было найдено более 550 тыс. решений. Поскольку при использовании соотношений (1) и (2) количество найденных решений напрямую зависит от дискретности толщин d_1 и d_2 , необходим ввод дополнительных критериев сортировки.

Схема, представленная на рис. 1, содержит одну, две и три линзы в первом, втором и третьем компоненте соответственно. Вопрос выбора количества линз в компоненте тесно связан с коррекционной аберрационной нагрузкой данного компонента. При выборе количества линз в компоненте учитывается относительное отверстие компонента, угловые поля, с которыми он работает, а также масса. Так, например, в исследуемой схеме горизонтальные поля зрения не очень большие – 5,5 и 13,7 градуса для наибольшего и наименьшего фокусного расстояния соответственно, поэтому упор сделан на коррекцию аберраций широких пучков лучей за счет усиления компонента, близкого к апертурной диафрагме.

Рассматривая хроматическую аберрацию положения как основную аберрацию, требующую коррекции для систем с широким спектральным диапазоном, можно предположить, что дисперсионные свойства отдельных компонентов играют важную роль в совокупной эффективности работы системы в широком спектральном диапазоне. В выражениях (2) для i -го компонента, состоящего из близкорасположенных тонких линз, приняты следующие обозначения, упрощающие выражения:

$$S_i = \left(\frac{\varphi}{v_{\text{ЭКВ}}} \right)_i = \sum_{j=1}^k \frac{\varphi_{i,j}}{v_{i,j}}. \quad (3)$$

Пользуясь выражением (3), нетрудно определить, что для компонента с двумя и более линзами эквивалентный коэффициент дисперсии принимает значения, отличные от известных материалов, расширяя тем самым область решений.

Для практических разработок наблюдается отдельный тренд на активное использование халькогенидных материалов [6]. Низкая температура размягчения данных материалов обуславливает преимущества их использования, позволяя формировать поверхности под давлением и спекать две и более линзы из различных материалов [7, 8], поэтому целесообразно разделить используемые материалы на кристаллические и халькогенидные стекла и учесть распределение решений по совокупности используемых материалов. На рис. 2 приведены диаграммы, иллюстрирующие распределение решений по используемой номенклатуре материалов.

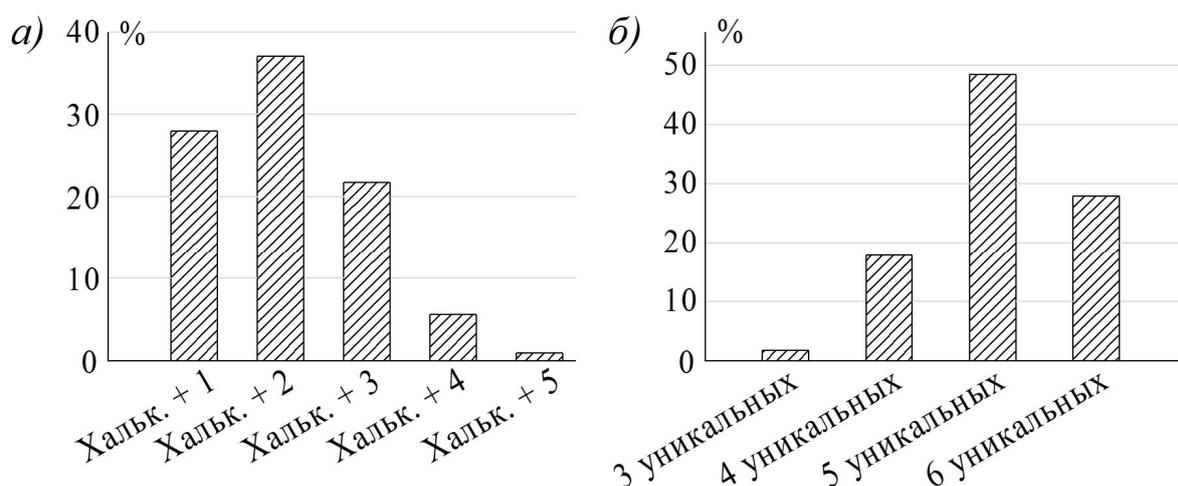


Рис. 2. Характер распределения решений: а) распределение по совокупности использования халькогенидных и прочих материалов; б) распределение по количеству уникальных материалов

Для иллюстрации в табл. 1 представлена выборка из шести вариантов стартовых систем из области решений.

Таблица 1

Выборка из шести вариантов стартовых систем

Материал линзы						Оптическая сила линзы						d_1	d_2
1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6		
IRG207	IRG209	ZnSe	KRS5	IRG209	ZnSe	0,60	-1,1	-0,80	4,18	-0,98	-1,02	0,8	0,3
IRG206	IRG202	IRG201	Ge	ZnSe	IRG202	0,39	0,16	-1,21	-1,43	-2,57	5,97	1,0	0,1
KRS5	IRG205	IRG203	IRG206	Ge	ZnSe	0,44	-1,24	0,06	8,03	-3,53	-2,48	0,9	0,1
Ge	IRG209	IRG207	ZnS	Ge	IRG207	0,72	-5,24	2,87	-0,43	-0,77	3,51	0,7	0,3
IRG202	KRS5	IRG205	Ge	IRG202	IRG209	0,78	3,24	-5,62	5,50	3,18	-6,32	0,6	0,2
IRG204	IRG209	ZnS	Ge	IRG209	IRG204	0,60	-1,64	-0,26	3,99	-5,53	3,73	0,8	0,3

При переходе от стартовой системы к системе с конечными толщинами и апертурами уровень хроматической коррекции, заложенный в стартовую систему, позволяет обеспечить качественное изображение в каждом из исследуемых диапазонов без смещения плоскости изображения. В качестве примера на основе стартовой системы, параметры которой приведены в первой строке табл. 1, создана оптическая система объектива с дискретной сменой фокусного расстояния 100 и 40 мм. На рис. 2 приведены графики интегрального качества системы после оптимизации для фокусных расстояний 100 и 40 мм. Угловые поля системы представлены для работы с приемником формата $640 \times 512 \times 0,015$ мм.

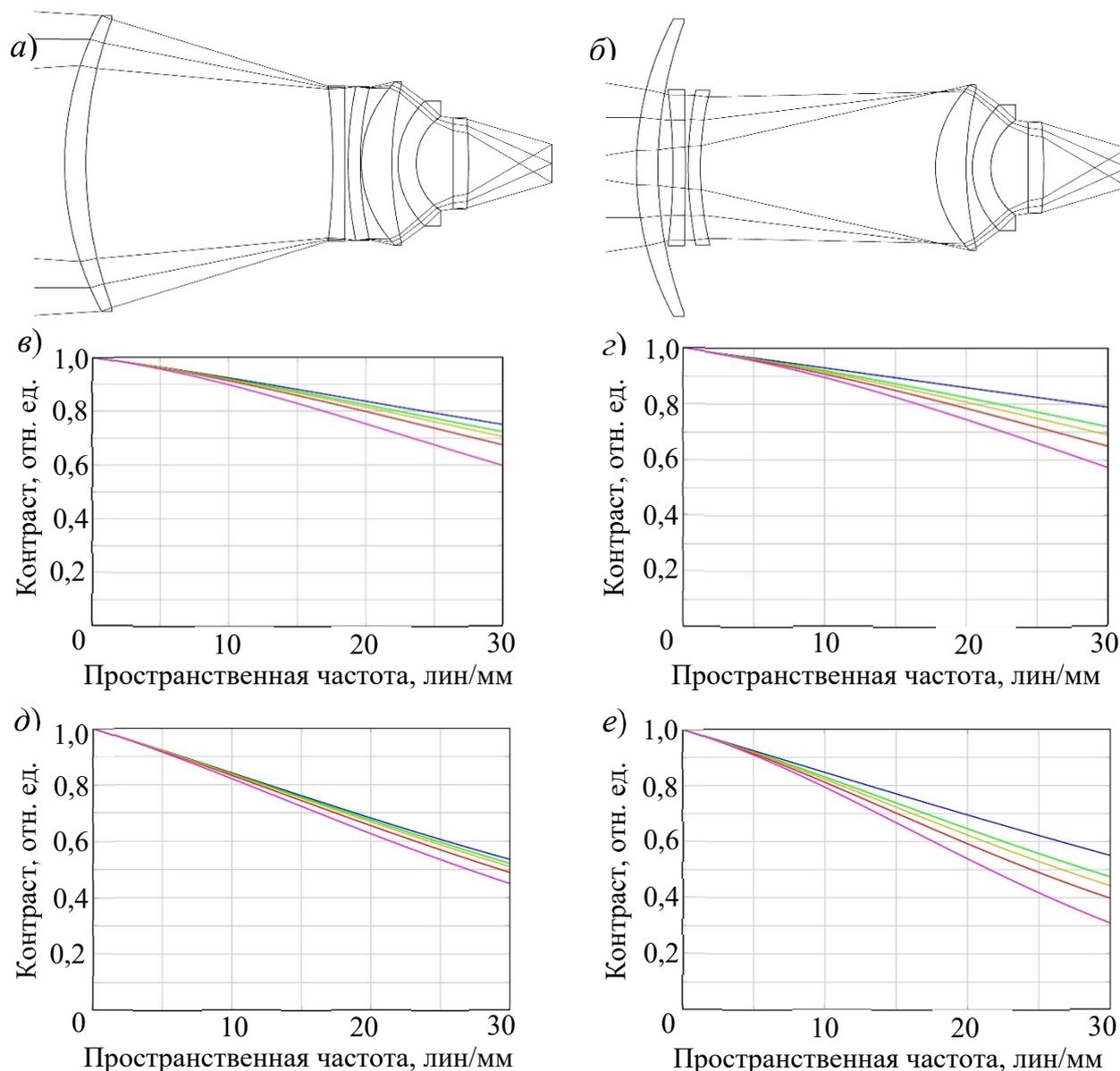


Рис. 3. Результат оптимизации оптической системы: а, в, д – оптическая система с ходом лучей и графики ЧКХ в MWIR и LWIR диапазонах при $f^* = 100$ мм; б, г, е – оптическая схема с ходом лучей и графики ЧКХ в MWIR и LWIR диапазонах при $f^* = 40$ мм

Таким образом, заложенная в модель коррекция хроматизма положения в рабочих спектральных диапазонах позволяет в ходе оптимизации добиться интегрального качества изображения, близкого к дифракционному для каждого из диапазонов и фокусных расстояний.

Заключение

Продолжение исследования двухдиапазонных инфракрасных объективов, начатое в [9], направленное на поиск стартовых систем и математическое моделирование хроматизма положения в них, позволяет утверждать, что для эффективного проектирования DWIR объективов целесообразно использовать стартовые системы, в которых хроматизм положения не превышает дифракционно ограниченного предела. Качество изображения, близкое к дифракционному пределу, обусловлено тем, что остаточный продольный хроматизм в рабочих спектральных диапазонах MWIR и LWIR составляет 1/6000 и 1/5100 от фокусного расстояния (при фокусном расстоянии 100 мм) и 1/10500 и 1/4000 (при фокусном расстоянии 40 мм). Таким образом, в ходе оптимизации сохраняется уровень коррекции продольного хроматизма, заложенный при создании стартовой системы – не более $2\lambda K^2$ для каждого из диапазонов и фокусных расстояний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кульчицкий Н. А., Наумов А. В., Старцев В. В. Матричные фотоприемные устройства ИК-диапазона: «постпандемические» тенденции развития. Часть I // Фотоника. – 2020. – № 3. – С. 234–244.
2. Кульчицкий, Н. А. Матричные фотоприемные устройства ИК-диапазона: «постпандемические» тенденции развития. Часть II // Фотоника. – 2020. – Т. 14. № 4. – С. 320–330.
3. Ramsey J. L., Unger B. L., Lindberg G. P. Design study of a MWIR/LWIR multiple FOV lens // Proc. SPIE 10627, Advanced Optics for Defense Applications: UV through LWIR III, 1062703 (8 May 2018). – 2018.
4. Vizgaitis J. N. Optical concepts for dual band infrared continuous zoom lenses // Proc. SPIE 7652, International Optical Design Conference 2010, 76522E (9 September 2010). – 2010.
5. Khatsevich T. N., Shmelev E. V. Development of dual-band infrared lenses // Proc. SPIE 12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 127800N (17 October 2023). – 2023.
6. Bayya S. S., Gibson D. и др. Expanded IR glass map with new NRL glasses for multispectral optics designs // Proc. SPIE 10181, Advanced Optics for Defense Applications: UV through LWIR II, (7 июня 2017). – 2017.
7. Gibson D., Bayya S. S. и др. Diffusion-based gradient index optics for infrared imaging // Optical Engineering. – 2020. – Т. 52, № 11. – С. 1–22.
8. Thermal properties of chalcogenide glasses // Chalcogenide Glasses Preparation, Properties and Applications / J. D. Musgraves, S. Danto, K. Richardson. – Woodhead Publishing Limited, 2013. – С. 82–112.
9. Шмелев Е. В., Хацевич Т. Н. Разработка двухдиапазонных инфракрасных объективов / Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2023. XIX Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2023»: сборник материалов Международной научной конференции (Новосибирск, 17–19 мая 2023 г.). – Новосибирск: СГУГиТ, 2023. – Т. 8. – С. 29–36.

© Е. В. Шмелев, Т. Н. Хацевич, 2024