

УДК 537.533.7

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ СТАБИЛЬНОСТИ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ НА ИСТОЧНИКАХ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ¹

© 2025 г. О. И. Мешков^{a, b, *}, В. Л. Дорохов^{a, c}, Д. Ф. Решетов^a, А. И. Стирин^d

^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

^c Центр коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов”
Института катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630559, Новосибирская обл., р. п. Кольцово, пр. Никольский, 1

^d Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

* e-mail: O.I.Meshkov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 01.12.2023 г.
После доработки 06.03.2024 г.
Принята к публикации 01.04.2024 г.

Анализируются результаты измерений поперечных размеров и координат центра тяжести пучка электронов накопителя курчатовского источника синхротронного излучения (КИСИ), полученные во время инъекции и при работе на пользователей. Анализировалось изображение пучка, зарегистрированное в оптическом диапазоне длин волн при помощи цифровой камеры на станции оптического наблюдения накопителя КИСИ. Проведен поиск возможных источников поперечной нестабильности пучка во время работы установки на пользователей.

DOI: 10.7868/S3034564225070047

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние и ближайшие десятилетия в центре внимания развития ускорительной физики находятся проекты линейных и циклических коллайдеров для экспериментов по физике высоких энергий (ILC, CLIC, FCC) и источники синхротронного излучения (СИ) четвертого поколения (Euro-XFEL, LCLS, Spring 8-FEL, СКИФ) [1, 2]. На всех континентах планеты, кроме Африки и Антарктиды, действует несколько десятков источников СИ, относящихся к разным поколениям установок, от второго до четвертого.

Эмиттанс пучка в ускорителе, а следовательно, и его поперечные размеры существенно уменьшаются от одного поколения источни-

ков СИ к другому. Вместе с тем, в состав каждого источника СИ неизбежно входит инжекционный комплекс, содержащий, как правило, бустерный накопитель, в котором пучок имеет существенно больший эмиттанс по сравнению с главным кольцом.

Требования к пространственной стабильности пучка в главном накопителе предельно высоки: речь идет о долях микрометра и десятках микро радиан [3]. При этом и требования к надежности работы источника СИ также весьма суровы: потребители хотят иметь возможность использовать излучение не менее 95% календарного времени в течение года. В связи с этим развитие методов диагностики пучка, нацеленных на выявление и предотвращение возможных источников пучковых неустойчи-

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, г. Новосибирск.

ностей, а также неисправностей разнообразных силовых систем установки представляется актуальным.

2. КУРЧАТОВСКИЙ ИСТОЧНИК СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ускорительный комплекс “КИСИ-Курчатов” состоит из линейного ускорителя и двух накопительных колец: бустера “Сибирь-1” и основного кольца “Сибирь-2”, относящегося к источникам СИ поколения 2+ [4, 5]. Основные параметры кольца накопителя “Сибирь-2” приведены в табл. 1. В стандартном режиме эксперимента ускоритель работает при энергии 2.5 ГэВ, а накопление осуществляется при энергии инжекции, равной примерно 450 МэВ. Станции пользователей получают СИ из поворотных магнитов и вставных устройств, вигглеров и ондулятора. Установка работает практически в безостановочном режиме, при этом в неделю проводится девять 12-часовых смен. Для обеспечения такого режима работы установки необходимо иметь возможность наблюдения за состоянием пучка.

На накопителе “Сибирь-2” действует 14 станций пользователей синхротронного излучения [6]. Научная аппаратура, работающая на станциях, постоянно совершенствуется, и точность экспериментальных исследований растет. Этот процесс сопровождается ростом требований пользователей к качеству пучка СИ и связанному с ним качеству электронного пучка, т.е. стабильности его свойств. Удовлетворять растущие потребности пользователей становится все сложнее, так как главный накопитель имеет эмиттанс $98 \text{ нм} \cdot \text{рад}$, а также ограниченный набор средств диагностики и стабилизации орбиты пучка.

3. ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПОПЕРЕЧНОЙ ДИНАМИКИ ПУЧКА

Для контроля орбиты пучка в накопителе используется система пикап-электродов, поперечные и продольный размеры пучка контролируются на отдельной станции оптического наблюдения [7]. Изображение пучка, регистрируемое цифровой камерой с использованием оптической части спектра СИ из поворотного магнита суперпериода “Сибирь-2”, постоянно присутствует на мониторе в главной пультовой ускорителя (рис. 1). Изображение строится на матрице камеры с помощью проекционной оптики, при этом необходимо отметить, что вертикальный размер пучка в точке наблюдения близок к дифракционному пределу ($\sigma_y \approx 50 \text{ мкм}$).

Стабилизация орбиты пучка в точках вывода СИ в накопителе осуществляется с помощью троек дипольных корректоров [4, 5]. На станции оптического наблюдения такая система стабилизации орбиты отсутствует, что позволяет отслеживать перемещения пучка, связанные с воздействием разнообразных факторов, как по радиусу, так и по вертикали, а также контролировать поперечные размеры пучка на протяжении длительных промежутков времени. В связи с жалобами пользователей СИ на эпизодически возникающие кратковременные смещения пучка, мешающие проведению прецизионных экспериментов, нами был проведен цикл измерений по изучению стабильности координат центра тяжести пучка и его поперечных размеров.

Изучение стабильности параметров пучка проводилось на станции оптического наблюдения. В первом цикле экспериментов нами были измерены амплитуды колебаний оптического

Таблица 1. Параметры накопителя “Сибирь-2” ускорительного комплекса “КИСИ-Курчатов” и характеристики электронного пучка в точке излучения, используемой для системы оптической диагностики

Параметр	Значение
Энергия E , ГэВ	0.45–2.5
Частота ускоряющего ВЧ-напряжения ν_{RF} , МГц	181.14
Периметр C , м	124.13
Время жизни ($E = 2.5 \text{ ГэВ}$), ч	10–25
Частота обращения, МГц	2.415
Размеры сгустка ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$), мм ($E = 2.5 \text{ ГэВ}, I_b = 1 \text{ мА}$)	0.059, 0.45, 20
Длительность сгустка, нс (на полувысоте, $E = 2.5 \text{ ГэВ}, I_b = 1 \text{ мА}$)	0.16
Число электронов в одном сгустке при токе $I_b = 1 \text{ мА}$	$2.6 \cdot 10^9$
Максимальный ток электронов, мА:	
— в односгустковом режиме	100
— в многосгустковом режиме	300

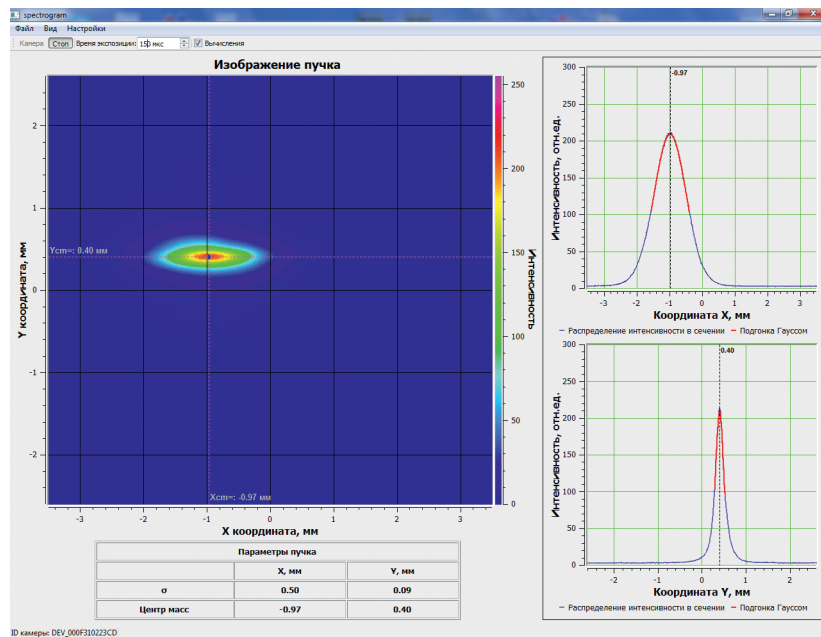


Рис. 1. Окно программы регистрации изображения пучка цифровой ПЗС-камеры.

стола, на котором расположены фотодетекторы станции оптического наблюдения, и амплитуды колебаний центра тяжести пучка с характерными частотами в диапазоне единиц–сотен герц [8], рис. 2.

Спектр вертикальных колебаний пучка содержит отчетливый пик на частоте 50 Гц, в спектре горизонтальных колебаний никаких особенностей обнаружено не было. С точки зрения поль-

зователей, регулярные колебания пучка с частотами в десятки герц увеличивают поперечный размер пучка, но не приводят к сбоям в юстировке аппаратуры, так как для проводимых на станциях КИСИ экспериментов временное разрешение не требуется. Вместе с тем в спектрах прослеживались и гармоники с частотами менее 1 Гц, природу которых хотелось бы прояснить, так как именно такие колебания заметно влияют

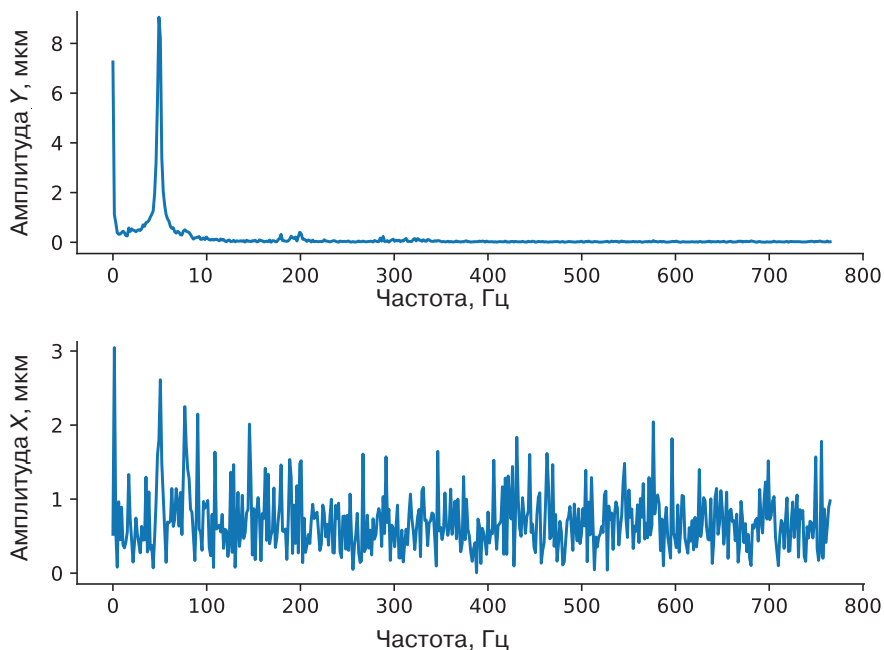


Рис. 2. Спектр колебаний центра тяжести пучка, зарегистрированный на станции оптического наблюдения.

на поток фотонов СИ при его точной фокусировке. Кроме того, такие колебания наблюдались и визуально на мониторе ТВ-камеры.

С этой целью поперечные колебания и изменения размеров пучка были записаны на станции оптического наблюдения на протяжении нескольких смен работы установки на пользователей, начиная с момента инжекции в пустой накопитель. Частота регистрации и обработки изображения пучка на цифровой камере составляла 7 Гц, на диск компьютера записывались вычисленные координаты центра тяжести и размеры (σ_x , σ_y) пучка. Программное обеспечение цифровой камеры было адаптировано под экспериментальную программу, время экспозиции камеры составляло 200 мкс. Такая запись про-

водилась дважды, весной и летом 2023 г. Результаты измерений представлены на рис. 3–6.

Зарегистрированное поведение координат и размеров пучка во время всех смен работы установки было качественно схоже. Резкие броски координат центра тяжести пучка в начале цикла записи связаны с процессами инжекции и ускорения сгустков, в этот промежуток времени накопитель, разумеется, на пользователей не работает. Далее на графике горизонтальной координаты (рис. 3) видны несколько колебаний пучка с амплитудой масштаба $0.1\sigma_x$, которые можно связать с работой систем стабилизации пучка на каналах пользователей, влияющих на орбиту в точке вывода СИ на станцию оптического наблюдения. Дальнейшие смещения

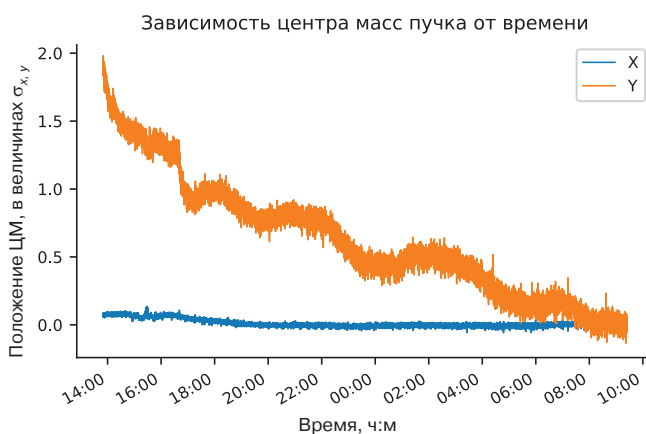


Рис. 3. Смещение центра тяжести пучка в главном накопителе КИСИ по горизонтальной координате (верхний график) и вертикальной координате (нижний график) на протяжении суток, приведенное к радиальному и вертикальному размеру. Период накопления и ускорения пучка на графиках не представлен.

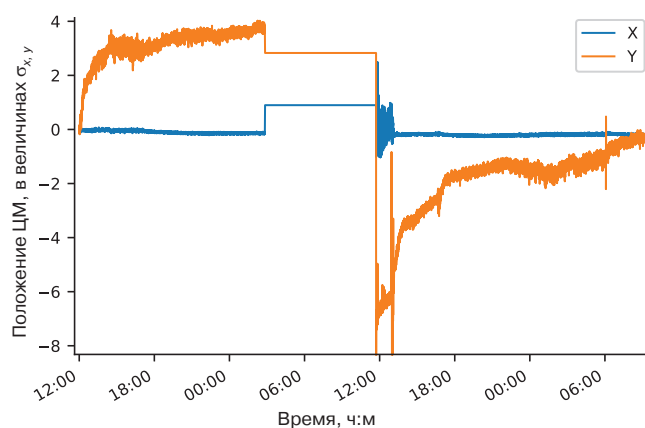


Рис. 4. Временное поведение вертикальной и горизонтальной координат центра тяжести пучка в главном накопителе КИСИ на протяжении двух последовательных смен, разделенных шестичасовым простоем установки.

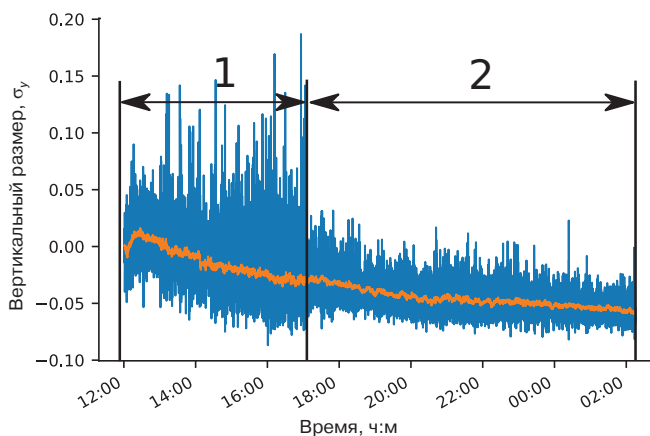
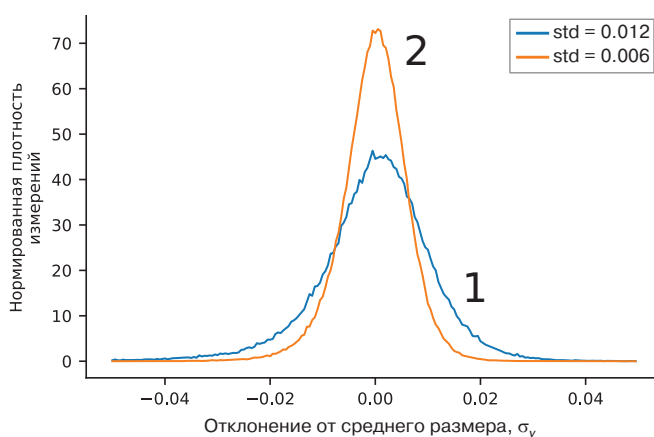


Рис. 5. Долговременное поведение и отклонение от среднего значения вертикального размера пучка в главном накопителе КИСИ.



орбиты по горизонтали не выходят за допустимые пределы $\pm 0.1\sigma_x$. На графике вертикальной координаты бросается в глаза плавный суточный дрейф на величину около $0.1\sigma_y$, сопровождаемый медленными колебаниями с амплитудой масштаба $0.1\sigma_y$ и периодом несколько часов.

На рис. 4 показаны совмещенные на одном графике вертикальные и горизонтальные координаты пучка на протяжении двух последовательных смен, разделенных шестичасовым простоям установки.

Заметно, что после возобновления работы установки вертикальная орбита пучка испытала заметное смещение как при накоплении, так и во время работы на пользователей СИ.

Временное поведение вертикального размера пучка σ_y представлено на рис. 5. За исключением периода накопления и ускорения, который занимает около часа, размеры пучка в основном сохраняют стабильность. Можно отметить токовую зависимость вертикального размера σ_y , который уменьшается на протяжении 12 часов на 10% и выделить два участка, различающихся в два раза по среднеквадратичному отклонению. На графике практически стабильного радиального размера временной зависимости горизонтального размера σ_x заметны несколько выбросов, один из которых показан на рис. 6 в крупном масштабе.

Такое поведение горизонтального размера логично связать с развитием фазовых колебаний пучка, спонтанно возникших и также исчезнувших в течение нескольких минут. Это, тем не менее, могло повлиять на результаты экспериментов пользователей СИ.

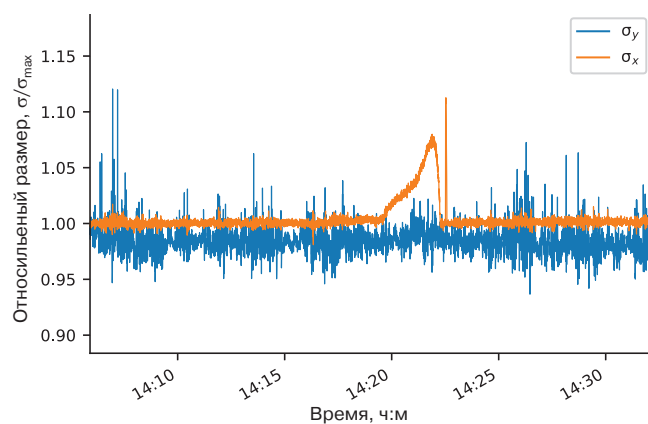


Рис. 6. Изменение размеров пучка в главном накопителе КИСИ, связанное, предположительно, с фазовыми колебаниями.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные измерения временной зависимости координат и размеров пучка в главном накопителе КИСИ выявили несколько характерных особенностей, способных оказать влияние на результаты экспериментов пользователей СИ. Две из них были известны ранее и вряд ли могут быть устранены: это токовая зависимость вертикального размера пучка и суточный дрейф его вертикальной координаты, связанный с температурным уходом фундамента здания главного накопителя КИСИ. Этот дрейф, однако же, теоретически может компенсироваться системами стабилизации пучка на каналах пользователей. Следует также отметить кратковременные изменения горизонтального размера пучка, связанные, предположительно, со спонтанными фазовыми колебаниями. При этом за все время записи не было отмечено долговременных колебаний центра тяжести пучка с дисперсией более $0.1\sigma_{x,y}$ при работе установки на пользователей, хотя изменения peak-to-peak как координат, так и размеров пучка на уровне $0.2\sigma_{x,y}$ явно присутствуют. Таким образом, стабильность координат и размеров пучка главного накопителя КИСИ в среднем соответствует требованиям к источникам СИ второго поколения. Разумеется, в процессе эксплуатации установки возможно появление разнообразных факторов, влияющих на стабильность пучка. Для выявления и анализа таких факторов может быть с успехом применена развитая на станции оптического наблюдения система оптической диагностики. Однако даже на примере нескольких суточных циклов регистрации параметров пучка можно видеть, что выявление источников низкочастотных шумов, влияющих на пучок, является весьма сложной задачей. Например, понять природу помехи, увеличивавшей вертикальный размер пучка на рис. 5, не удалось. Низкочастотные помехи имеют явно шумовой, а не гармонический характер и могут быть связаны, например, с работой вентиляции здания или вибрацией его фундамента.

Приобретенный опыт позволяет также сделать определенные выводы для оптической диагностики пучка в бустере и главном накопителе источника СИ СКИФ, строящегося в Новосибирске. Как видно, постоянный количественный контроль за координатами и размерами пучка с помощью оптической диагностики

весьма полезен для поддержания стабильности работы установки. Это требование уже включено в техническое задание для программного обеспечения такой диагностики на бустере СКИФ. То же относится и к аналогичным параметрам пучка в главном накопителе СКИФ, хотя здесь размеры пучка могут быть определены лишь при помощи интерферометрических измерений, которые запланированы. В случае проектной стабильности пучка СКИФ точность измерений координат центра тяжести, определяемых проекционной оптикой, будет недостаточна из-за дифракционных ограничений, однако же и эта информация может сигнализировать о появлении проблем в работе установки, поэтому в систему оптической диагностики СКИФ заложен стандартный способ регистрации изображения пучка, хотя и в УФ диапазоне.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-22-00-177).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shin S.* // AAPPS Bulletin. 2021. V. 31. № 1. P. 21. <https://doi.org/10.1007/s43673-021-00021-4>.
2. *Bukhtiyarov A.V., Bukhtiyarov, V. I., Zhuravlev A.N., Zolotarev K.V., Zubavichus Y.V., Levichev E.B., Mezentsev N.A., Nikolenko A.D., Piminov P.A., Churkin I.N.* // Crystallography Reports. 2022. V. 67(5). P. 690. <https://doi.org/10.1134/S1063774522050029>
3. *Hettel R.O.* // Rev. Sci. Instr. 2002. V. 73. P. 1396.
4. *Валентинов А.Г., Воблый П.Д., Михайлов С.Ф., Гаврилов Н.Г., Зубков Н.И., Корчуганов В.Н., Кузьминых В.С., Кулипанов Г.Н., Левичев Е.Б., Трахтенберг Э.М., Эрг Г.И.* Магнитная система накопителя “Сибирь-2” – специализированного источника СИ. Препринт 89–174, ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 1989.
5. *Blokhov M., Leonov V., Fomin E., Kovachev G., Korchuganov V., Kovalchuk M., Krylov Yu., Kvardakov V., Moryakov V., Odintsov D., Smoliakov N., Tomin S., Tarasov Yu., Ushkov V., Valentinov A. et al.* // Proc. of RuPAC-2010. Protvino. Russia. 2010. С. 136.
6. <http://kcsni.nrcki.ru/pages/main/sync/beamlines/index.shtml>
7. *Meshkov O., Stirin A., Kovachev G., Korchuganov V., Odintsov D., Tarasov Yu., Valentinov A., Zabelin A., Borin V., Dorokhov V., Khilchenko A., Kvashnin A., Kotelnikov A., Schegolev L., Zinin E. et al.* // Journal of Instrumentation. 2016. V. 11. № 12. P. 12015. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/12/p12015>
8. *Дорохов В.Л., Мешкова О.И., Стирин А.И., Смыгачева А.С.* // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20. № 5(250). С. 1181.