Артефакты оптической когерентной томографии

А.А. Шпак — д-р мед. наук, профессор, заведующий отделом клинико-функциональной диагностики
М.В. Коробкова — аспирант

ФГАУ НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России,
127486, Москва, Бескудниковский б-р, д. 59а

Цель работы — изучение и классификация артефактов спектральной оптической когерентной томографии (ОКТ). **Материал и методы.** Ретроспективно изучены данные ОКТ 112 пациентов (112 глаз), осмотренных на двух аппаратах Cirrus HD-OCT (Carl Zeiss Meditec) последовательно в течение 3 (исследования макулярной области, 67 человек) и 5 (исследования области диска зрительного нерва (ДЗН), 62 человека) дней, в том числе 17 человек, которым проводились исследования обоих видов. На предмет наличия артефактов оценивали как исходные данные сканирования (В-сканы), так и результаты их последующего анализа. **Результаты.** Предложены критерии артефактов ОКТ и их рабочая классификация, выделяющая три вида артефактов: ошибки сегментирования / определения границ ДЗН, «срезание» скана и смещение/выпадение сканов, а также 8 основных причин ошибок. Частота артефактов варьировала от 19 % (анализ области ДЗН) до 37 % (анализ макулярной области) и 65 % (оценка макулярного слоя ганглиозных клеток с внутренним плексиформным). Наиболее распространены были ошибки сегментирования у пациентов с резко выраженными нарушениями или эпиретинальными мембранами (фиброзом). **Заключение.** Клинически значимые артефакты ОКТ встречаются в 19–65 % случаев в зависимости от анализируемых структур глазного дна. Наиболее распространены ошибки сегментирования у пациентов с резко выраженными нарушениями и эпиретинальными мембранами (фиброзом). Предложена рабочая классификация артефактов ОКТ, выделяющая три основных их вида и наиболее важные причины их появления.

Ключевые слова: оптическая когерентная томография, артефакты, классификация, диск зрительного нерва, макулярная область, слой ганглиозных клеток с внутренним плексиформным.

Для цитирования: Шпак А.А., Коробкова М.В. Артефакты оптической когерентной томографии. Российский офтальмологический журнал. 2019; 12 (1): 75-80. doi: 10.21516/2072-0076-2019-12-1-75-80

Понятие «артефакт» в медицине не имеет строгого определения. В медицинской визуализации под артефактом понимают любое изменение, не отражающее структуру тканей, а порожаемое методикой исследования [1]. Своевременное распознавание артефактов играет важную роль, особенно при оценке количественных результатов оптической когерентной томографии (ОКТ). В ряде зарубежных работ изучались артефакты спектральной ОКТ в зависимости от используемой аппаратуры и при разных формах офтальмопатологии [2–9], в то время как в отечественной литературе артефакты ОКТ только упоминаются в обзорных статьях [10, 11]. До настоящего времени не выработано общепринятой классификации артефактов ОКТ.

В связи с изложенным **ЦЕЛЬЮ** настоящей работы явилось изучение и классификация артефактов спектральной ОКТ.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Ретроспективно изучены данные ОКТ 112 пациентов (112 глаз), осмотренных на двух аппаратах Cirrus HD-OCT (Carl Zeiss Meditec) последовательно в течение 3 (исследования макулярной области, 67 человек) и 5 (исследования области диска зрительного нерва (ДЗН), 62 человека) дней, в том числе 17 человек, которым проводились исследования обоих видов.

Критерием включения было только достаточное качество сканирования (сила сигнала не менее 5 из 10 возможных).

У всех испытуемых исследовали оба глаза, однако оценивали только один глаз, избранный случайным методом, или, при односторонней патологии, глаз с наличием патологии, или, при недостаточной силе сигнала на одном глазу, парный глаз.

Сканирование макулярной области осуществлялось по протоколу Macular Cube 512×128 , области ДЗН — по протоколу Optic Disc Cube 200×200 , включавших 128 и 200 В-сканов соответственно.

На предмет наличия артефактов оценивали как результаты сканирования (все В-сканы), так и результаты их последующего анализа: два протокола для макулярной области — Macular Thickness Analysis (оценка толщины сетчатки), Ganglion Cell Analysis (оценка слоя ганглиозных клеток с внутренним плексиформным — СГКВП), а также протокол анализа ДЗН и перипапиллярного слоя нервных волокон сетчатки (пСНВС) — ONH and RNFL OU Analysis.

Оценку проводили оба автора статьи, при расхождении мнений добивались консенсуса. Изменения единичных В-сканов не рассматривали как артефакт. Для макулярной сетчатки артефактом считали изменения, после коррекции которых в режиме редактирования толщина сетчатки в фовеальной или одной из парафовеальных зон изменялась не менее чем на $10 \mu\text{m}$. Для СГКВП артефактом считали изменения, не имеющие органического субстрата, но при этом вызывающие либо отличие средней толщины СГКВП от парного здорового глаза не менее $4 \mu\text{m}$, либо выраженные (красного цвета) или умеренные (желтой окраски) изменения хотя бы одного количественного показателя. Для пСНВС и ДЗН артефактом считали латеральное смещение сканов в зоне измерений при движении глаз $\geq 75 \mu\text{m}$ или выпадение сканов при мигании, а также ошибки определения границ ДЗН $\geq 75 \mu\text{m}$ на двух и более соседних радиальных срезах.

Описательный характер результатов не требовал их статистической обработки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

У двух человек (с катарактой и с выраженной возрастной макулодистрофией) программному обеспечению прибора не удалось выполнить анализ СГКВП, поэтому число пациентов с данным видом анализа составило 65.

Кроме трех детей 6–8 лет, испытуемые (68 женщин, 44 мужчины) были в возрасте от 19 до 86 лет.

Исследование макулярной области проводили у пациентов с возрастной макулодистрофией (21), диабетической ретинопатией и макулопатией (9), эпиретинальной мембраной или фиброзом (9), катарактой (4), глаукомой (3) и другими формами патологии (11); у 10 человек патологии не было выявлено. Исследование области ДЗН выполняли при глаукоме (22), застойном и псевдозастойном ДЗН (3), неглаукомной частичной атрофии зрительного нерва (1) и других заболеваниях (5); на 31 глазу патологии не было выявлено.

Данные о видах, причинах и частоте артефактов приведены в таблице. Первые 2 столбца таблицы представляют собой предложенную рабочую классификацию артефактов ОКТ и их причин (некоторые

пояснения и дополнения рассмотрены в разделе «Обсуждение результатов»).

Как следует из таблицы, артефакты чаще выявлялись при исследовании макулярной области, особенно макулярного СГКВП. Здесь преобладали ошибки сегментирования, т. е. неправильное выделение (определение границ) сетчатки или ее слоев. Основной причиной таких ошибок была резко выраженная патология различного характера (возрастная макулодистрофия, диабетический макулярный отек, тромбоз центральной вены сетчатки и пр.), которая препятствовала визуализации как наружной границы сетчатки, так и границ СГКВП (рис. 1). Другой важной причиной была эпиретинальная мембрана (фиброз), которая не позволяла правильно проложить линии внутренней границы сетчатки и особенно границ СГКВП (рис. 2). Для наглядности на обоих рисунках изменен цвет и толщина линий сегментирования.

Несмотря на достаточный опыт операторов, в ряде случаев они допускали ошибки, порождавшие артефакт «срезания скана» сверху. Вероятно, в слу-

Рис. 1. Ошибки сегментирования в анализах макулярной сетчатки (А—В) и СГКВП (Г—Е) у пациента с тромбозом верхней ветви центральной вены сетчатки. В зоне отека кверху от фовеа (В) наружная граница сетчатки выделена неправильно (А), в результате на схеме (Б) верхняя зона представлена резко истонченной (красного цвета). СГКВП неправильно сегментирован как с внутренней, так и с наружной стороны в фовеальной области (Е) и за счет этого резко истончен, а в верхних отделах не определяется (Г, Д).
Fig. 1. Segmentation errors in the analysis of the macular retina (А—В) and GCIPL (Г—Е) in a patient with branch retinal vein occlusion. At the edema zone upward from the fovea (В) the outer border of the retina is delineated incorrectly (А); as a result, in the scheme (Б) the upper zone is shown as severely thinned (of the red color). Both inner and outer borders of the GCIPL are segmented incorrectly in the foveal region (Е); as a result GCIPL is severely thinned, and at the upper sections is shown as absent (Г, Д).

Таблица. Рабочая классификация артефактов ОКТ и их причин (в рамке). Артефакты ОКТ у обследованных пациентов
Table. Working classification of OCT artefacts and their causes (in box). Artefacts of OCT in the examined patients

Артефакт Artifact	Причина Cause	Анализ Analysis		
		макулярная область macular area n = 67	СГКВП GCIPL n = 65	пЧНВС и ДЗН pRNFL and OND n = 62
Ошибка сегментирования/ определения границ ДЗН Segmentation error/ errors in delineation of the optic disc borders	Резко выраженные нарушения Pronounced pathology	11	26	1
	Эпиретинальная мембрана / фиброз Epiretinal membranes / fibrosis	4	8	3
	Помутнения оптических сред глаза Opacification of the media of the eye	2	1	3
	Аномалии рефракции* Refractive errors*	—	—	1
	Ошибки программного обеспечения Software errors	—	2	2
	Сочетание причин Combination of causes	5	3	—
«Срезание» скана Out-of-register artifacts	Ошибки оператора Technician errors	5	1	—
	Аномалии рефракции*	1	1	—
Смещение/выпадение сканов Displacement/fallout of B-scans	Движение глаз, мигание Eye movement, blinking	5**	4**	3
	Нистагм Nystagmus	1	1	—
Всего артефактов: Total artifacts:		34	47	13
Всего больных: Total patients:		25 (37 %)	42 (65 %)	12 (19 %)

Примечание. * — близорукость высокой степени (также имела место у одного пациента в строке «сочетание причин»), ** — не оказывали существенного влияния на результаты, n — количество глаз.

Note: * — high-degree myopia (also occurred in one patient in the line “Combination of causes”), ** — did not have a significant impact on the results, n — number of eyes.

Рис. 2. Ошибки сегментирования в анализах макулярной сетчатки (верхний скан) и СГКВП (нижний скан) у пациента с эпиретинальной мембраной. Внутренние границы и сетчатки и СГКВП проложены по эпиретинальной мембране, что существенно увеличивает толщину измеряемых объектов; наружные границы сегментированы правильно.

Fig. 2. Segmentation errors in analyses of the macular retina (upper scan) and GCIPL (lower scan) in a patient with an epiretinal membrane. Inner borders of both retina and GCIPL are placed along the epiretinal membrane, which significantly increases the thickness of the measured objects; the outer borders are segmented correctly.

чаях очевидной патологии операторы рассматривали количественные измерения как второстепенные и не добивались устранения такого рода артефактов, что обычно не представляет технических трудностей.

ОБСУЖДЕНИЕ

Отсутствие общепринятых определений артефактов ОКТ приводит к очень большому разбросу данных об их частоте. Ряд авторов считают артефактом любые ошибки анализа/сегментирования, в том числе даже на единичном В-скане. В таких работах частота артефактов доходит до 42–55 % [2, 7, 8] и даже до 77–91 % [5, 9]. Некоторые авторы пытались также выделить клинически значимые артефакты и дать их количественное определение. Например, для фовеальной зоны предлагался критерий изменения толщины сетчатки после коррекции в режиме редактирования > 10 % или > 50 μm [5] либо > 5 % [3, 7]. В этих работах частота артефактов для макулярной области была ниже — 5–8 и 22,7–28,2 % соответственно. Очевидно, что любые количественные критерии носят во многом субъективный характер.

Для макулярной зоны мы использовали критерий $\geq 10 \mu\text{m}$, что примерно соответствует удвоенной повторяемости измерений (repeatability limit) у здоровых лиц [12]. В результате ошибки сегментирования составили 33 % (22 из 67), что сопоставимо с данными некоторых авторов [3, 7]. Критерий для СГКВП ($\geq 4 \mu\text{m}$) был выбран также по принципу удвоенной повторяемости [12].

Согласно результатам настоящего исследования, ошибки программного обеспечения весьма редко являются причиной артефактов. Вместе с тем многие потенциальные артефакты, очевидно, могут быть частично или полностью ликвидированы путем совершенствования программного обеспечения приборов. Это видно на примере артефактов, связанных с движениями глаз, которые были клинически значимыми только при анализе области ДЗН. Очевидно, в анализах макулярной области и СГКВП, в отличие от области ДЗН, программное обеспечение прибора позволяло нивелировать влияние смещения сканов, обусловленного движениями глаз. Определенным несовершенством существующего программного обеспечения можно объяснить и большую частоту артефактов в анализах СГКВП. Однако следует учитывать, что данный анализ предназначен в первую очередь для пациентов с глаукомой, а не для больных с макулярной патологией, которые преобладали в настоящем исследовании. Впрочем, альтернативным объяснением может быть избыточная чувствительность предложенных критериев артефактов для анализа СГКВП.

Вопрос классификации артефактов ОКТ остается весьма спорным. Разные авторы выделяют от 3 [13] до 12 видов артефактов [8]. Хотя в предлагаемой рабочей классификации мы ограничились наиболее значимыми видами артефактов и их причинами, их перечень не является исчерпывающим. У обследованных пациентов не встречались и не включены в таблицу такие менее распространенные виды артефактов, как, например, зеркальный («отражение» скана) [6], который имеет место, когда сетчатка частично отслоена или приподнята патологическим образованием более чем на 2 мм (стандартная высота скана). Не включена такая причина ошибок сегментирования, как загрязнение объектива прибора, которая встречается только у неопытных операторов. Отсутствуют и более редкие причины артефактов: сильное сужение зрачка, выраженный синдром сухого глаза [14], сканирование не по центру зрачка [4] и др.

Представленные результаты указывают на весьма высокую частоту различных артефактов ОКТ. В связи с этим общей рекомендацией является постоянная настороженность в отношении артефактов, что обеспечивает их своевременное выявление. Необходимо обязательное максимально внимательное рассмотрение не только результатов анализа, но также и исходного материала (В-сканов), особенно

в случаях, когда количественные результаты ОКТ не соответствуют клиническим данным и результатам других исследований.

К сожалению, приборы для ОКТ не всегда обеспечивают возможность корректировки выявленных артефактов в ручном режиме. Так, прибор Cirrus HD-ОКТ допускает коррекцию границ сетчатки (часто весьма трудоемкую), однако не позволяет вносить исправления в анализы СГКВП и пСНВС. При наличии очевидных артефактов в таких анализах оператору следует отметить это в текстовом заключении и на самой распечатке для исключения неверной трактовки результатов исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Клинически значимые артефакты ОКТ встречаются в 19–65 % случаев в зависимости от анализируемых структур глазного дна. Наиболее распространены ошибки сегментирования у пациентов с резко выраженными нарушениями и эпиретинальными мембранами (фиброзом). Предложена рабочая классификация, выделяющая три основных вида артефактов ОКТ и их наиболее важные причины.

Конфликт интересов: отсутствует.

Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Литература

1. Artifact. Доступно на: <https://medical-dictionary.thefreedictionary.com/artifact>
2. Alshareef R., Goud A., Mikhail M., et al. Segmentation errors in macular ganglion cell analysis as determined by optical coherence tomography in eyes with macular pathology. *Int. J. Retina Vitreous*. 2017; 3: 25. doi: 10.1186/s40942-017-0078-7
3. Asrani S., Essaid L., Alder B., Santiago-Turla C. Artifacts in spectral-domain optical coherence tomography measurements in glaucoma. *JAMA Ophthalmol*. 2014; 132 (4): 396–402. doi: 10.1001/jamaophthalmol.2013.7974
4. Balk L., de Vries-Knopert W., Petzold A. A simple sign for recognizing off-axis OCT measurement beam placement in the context of multicentre studies. *PLoS One*. 2012; 7 (11): e48222. doi: 10.1371/journal.pone.0048222
5. Han I., Jaffe G. Evaluation of artifacts associated with macular spectral-domain optical coherence tomography. *Ophthalmology*. 2010; 117 (6): 1177–89. doi: 10.1016/j.ophtha.2009.10.029
6. Ho J., Castro D., Castro L., et al. Clinical assessment of mirror artifacts in spectral-domain optical coherence tomography. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci*. 2010; 51 (7): 3714–20. doi: 10.1167/iovs.09-4057
7. Lee S., Kwon H., Bae H., et al. Frequency, type and cause of artifacts in swept-source and Cirrus HD optical coherence tomography in cases of glaucoma and suspected glaucoma. *Curr. Eye Res*. 2016; 41 (7): 957–64. doi: 10.3109/02713683.2015.1075219
8. Liu Y., Simavli H., Que C., et al. Patient characteristics associated with artifacts in Spectralis optical coherence tomography imaging of the retinal nerve fiber layer in glaucoma. *Am. J. Ophthalmol*. 2015; 159 (3): 565–76. doi: 10.1016/j.ajo.2014.12.006
9. Waldstein S., Gerendas B., Montuoro A., et al. Quantitative comparison of macular segmentation performance using identical retinal regions across multiple spectral-domain optical coherence tomography instruments. *Br. J. Ophthalmol*. 2015; 99 (6): 794–800. doi: 10.1136/bjophthalmol-2014-305573

10. Аветисов С.Э., Кац М.В. Использование оптической когерентной томографии в диагностике заболеваний сетчатки (обзор литературы). *Universum: Медицина и фармакология: электронный научный журнал*. 2017; 4 (38). Доступно на: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-opticheskoy-kogerentnoy-tomografii-v-diagnostike-zabolevaniy-setchatki-obzor-literatury>.
11. Курьшова Н.И. Оптическая когерентная томография в диагностике глаукомной оптиконеуропатии. Часть 2. *Национальный журнал глаукома*. 2016; 15 (3): 60–70.
12. Cirrus HD-OCT User Manual – Models 500, 5000. Carl Zeiss Meditec, Inc., 2015.
13. Mansouri K., Medeiros F., Tatham A., et al. Evaluation of retinal and choroidal thickness by swept-source optical coherence tomography: repeatability and assessment of artifacts. *Am. J. Ophthalmol.* 2014; 157 (5): 1022–32. doi: 10.1016/j.ajo.2014.02.008
14. Hardin J., Taibbi G., Nelson S., Chao D., Vizzeri G. Factors affecting Cirrus-HD OCT optic disc scan quality: a review with case examples. *J. Ophthalmol.* 2015; Article ID 746150: 16p. doi: 10.1155/2015/746150

Поступила: 18.06.2018

Artifacts of optical coherence tomography

A.A. Shpak — Dr. Med. Sci., Professor, head of clinical & functional diagnostics department

M.V. Korobkova — Ph.D. student, clinical & functional diagnostics department

S. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution, 59a, Beskudnikovsky Blvd., Moscow, 127486, Russia
korobkova1@inbox.ru

Purpose. To study and classify artifacts of spectral-domain optical coherence tomography (OCT). **Material and methods.** The retrospective study included OCT data of 112 patients (112 eyes) examined on two Cirrus HD-OCTs (Carl Zeiss Meditec) sequentially for three days (macular area examinations, 67 patients) and five days (examination of the optic disc region, 62 people), including 17 people who underwent both types of examination. Both the original scanning data (B-scans) and the results of their subsequent analysis were evaluated for the presence of artifacts. **Results.** The criteria of OCT artifacts were suggested and their practical classification was proposed, which distinguishes three types of artifacts: segmentation errors/errors in delineation of the optic disc borders, "out-of-register" artifacts and displacement/fallout of B-scans, and eight main causes of artifacts. The frequency of artifacts ranged from 19 % (analysis of the optic disc area) to 37 % (analysis of the macular area) and 65 % (evaluation of the ganglion cell-inner plexiform layer). The most common were segmentation errors in patients with pronounced pathology or epiretinal membranes (fibrosis). **Conclusion.** Clinically significant OCT artifacts occur in 19–65 % of cases, depending on the analyzed eye fundus structures. The most common artifacts are segmentation errors in patients with pronounced pathology and epiretinal membranes (fibrosis). A practical classification of OCT artifacts is proposed, which distinguishes three main types and the most important causes of their presence.

Keywords: optical coherence tomography, artifacts, classification, optic disc, macular area, ganglion cell-inner plexiform layer

For citation: Shpak A.A., Korobkova M.V. Artifacts of optical coherence tomography. *Russian ophthalmological journal*. 2019; 12 (1): 75–80 (In Russian). doi: 10.21516/2072-0076-2019-12-1-75-80

Conflict of interests: there is no conflict of interests.

Financial disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

References

1. Artefact. Available at: <https://medical-dictionary.thefreedictionary.com/artifact>
2. *Alshareef R., Goud A., Mikhail M., et al.* Segmentation errors in macular ganglion cell analysis as determined by optical coherence tomography in eyes with macular pathology. *Int. J. Retina Vitreous*. 2017; 3: 25 doi: 10.1186/s40942-017-0078-7
3. *Asrani S., Essaid L., Alder B., Santiago-Turla C.* Artifacts in spectral-domain optical coherence tomography measurements in glaucoma. *JAMA Ophthalmol*. 2014; 132 (4): 396–402. doi: 10.1001/jamaophthalmol.2013.7974
4. *Balk L., de Vries-Knoppert W., Petzold A.* A simple sign for recognizing off-axis OCT measurement beam placement in the context of multicentre studies. *PLoS One*. 2012; 7 (11): e48222. doi: 10.1371/journal.pone.0048222
5. *Han I., Jaffe G.* Evaluation of artifacts associated with macular spectral-domain optical coherence tomography. *Ophthalmology*. 2010; 117 (6): 1177–89. doi: 10.1016/j.ophtha.2009.10.029
6. *Ho J., Castro D., Castro L., et al.* Clinical assessment of mirror artifacts in spectral-domain optical coherence tomography. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci*. 2010; 51 (7): 3714–20. doi: 10.1167/iops.09-4057
7. *Lee S., Kwon H., Bae H., et al.* Frequency, type and cause of artifacts in swept-source and Cirrus HD optical coherence tomography in cases of glaucoma and suspected glaucoma. *Curr. Eye Res*. 2016; 41 (7): 957–64. doi: 10.3109/02713683.2015.1075219
8. *Liu Y., Simavli H., Que C., et al.* Patient characteristics associated with artifacts in Spectralis optical coherence tomography imaging of the retinal nerve fiber layer in glaucoma. *Am. J. Ophthalmol*. 2015; 159 (3): 565–76. doi: 10.1016/j.ajo.2014.12.006
9. *Waldstein S., Gerendas B., Montuoro A., et al.* Quantitative comparison of macular segmentation performance using identical retinal regions across multiple spectral-domain optical coherence tomography instruments. *Br. J. Ophthalmol*. 2015; 99 (6): 794–800. doi:10.1136/bjophthalmol-2014-305573
10. *Avetisov S., Kats M.* Using optical coherent tomography in diagnosis of retinal diseases. (Review of literature). *Universum: Meditsina i farmakologiya: elektron. nauchn. zhurn*. 2017; 4 (38). Available at: <http://7universum.com/ru/med/archive/item/4561> (in Russian).
11. *Kuryшева N.I.* Optical coherence tomography in glaucoma optic neuropathy diagnostics. Part 2. *Natsional'nyi zhurnal glaucoma*. 2016; 15 (3): 60–70 (in Russian).
12. *Cirrus HD-OCT User Manual – Models 500, 5000.* Carl Zeiss Meditec, Inc., 2015.
13. *Mansouri K., Medeiros F., Tatham A., et al.* Evaluation of retinal and choroidal thickness by swept-source optical coherence tomography: repeatability and assessment of artifacts. *Am. J. Ophthalmol*. 2014; 157 (5): 1022–32. doi: 10.1016/j.ajo.2014.02.008
14. *Hardin J., Taibbi G., Nelson S., Chao D., Vizzeri G.* Factors affecting Cirrus-HD OCT optic disc scan quality: a review with case examples. *J. Ophthalmol*. 2015; Article ID 746150: 16p. doi: 10.1155/2015/746150