

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
КАБАРДИНО-БАЛКАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. Х.М. БЕРБЕКОВА

2012

Вып. 10

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Учредитель

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Кабардино-Балкарский
государственный университет им. Х.М. Бербекова»
360004 Нальчик, ул. Чернышевского 173*

Журнал зарегистрирован

*в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания
и средств массовых коммуникаций в 2003 г.
(свидетельство ПИ №77-16938 от 28 ноября 2003 г.)*

Адрес редакции: 360004 Нальчик, ул. Чернышевского 173

Телефон: (866-2)-423777 Факс: (095)-9563504

E-mail: avse@kbsu.ru

Редакционная коллегия:

Главный редактор: Хапачев Ю.П. – доктор физ.-мат. наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик

Зам. главного редактора: Дышеков А.А. – доктор физ.-мат. наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик

- | | |
|-----------------|--|
| Абрамов А.М. | – чл.-корр. Российской академии образования, Московский институт развития образования, г. Москва |
| Аристов В.В. | – чл.-корр. РАН, Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов, г. Москва |
| Бахмин В.И. | – исполнительный директор Института Открытое общество, г. Москва |
| Григорьев М.С. | – доктор химических наук, Институт физической химии РАН, г. Москва |
| Ивахненко Е.Н. | – доктор философских наук, профессор, РГГУ, г. Москва |
| Ильяшенко Ю.С. | – доктор физ.-мат. наук, профессор, МИРАН, г. Москва |
| Карамурзов Б.С. | – доктор технических наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик |
| Кетенчиев Х.А. | – доктор биологических наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик |
| Кочесоков Р.Х. | – доктор философских наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик |
| Крайзман В.Л. | – доктор физ.-мат. наук, профессор, Мэрилендский университет, Национальный институт стандартов и технологий. США |
| Лисичкин Г.В. | – доктор химических наук, профессор, МГУ, г. Москва |
| Лю Цзо И | – доктор технических наук, профессор, Технологический университет, г. Гуанджоу, Китай |
| Молодкин В.Б. | – чл.-корр. НАН Украины, профессор, Институт металлофизики НАН Украины, г. Киев |
| Оранова Т.И. | – доктор химических наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик |
| Ошхунов М.М. | – доктор технических наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик |
| Савин Г.И. | – академик РАН, профессор, Отдел информатики и вычислительной техники РАН, г. Москва |
| Скворцов Н.Г. | – доктор социологических наук, профессор, С.-Пб. госуниверситет, г. Санкт-Петербург |
| Ткачук В.А. | – академик РАН, академик АМН, профессор, МГУ, г. Москва |
| Тлибеков А.Х. | – доктор технических наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик |
| Филатов В.П. | – доктор философских наук, профессор, Российский государственный гуманитарный университет, г. Москва |
| Шустова Т.И. | – доктор биологических наук, профессор, СПб. НИИ уха, горла, носа и речи, г. Санкт-Петербург |
| Шхануков М.Х. | – доктор физ.-мат. наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик |



А.Д. Меншиков. 1716–1720 гг.

Его товарищи, сыны:
И Шереметев благородный,
И Брюс, и Боур, и Репнин,
И, счастья баловень безродный,
Полудержавный властелин

А.С. Пушкин, «Полтава»

ЛОНДОНСКОЕ КОРОЛЕВСКОЕ ОБЩЕСТВО РОССИЙСКИЕ И СОВЕТСКИЕ ЧЛЕНЫ ОБЩЕСТВА

1. Меншиков Александр Данилович, государственный и военный деятель (избран в 1714 году).
2. Крузенштерн Иван Фёдорович, географ, мореплаватель (избран в 1837 году).
3. Струве Отто Васильевич, астроном (избран в 1873 году).
4. Чебышев Пафнутий Львович, математик и механик (избран в 1877 году).
5. Ковалевский Александр Онуфриевич, эмбриолог (избран в 1885 году).
6. Менделеев Дмитрий Иванович, химик (избран в 1892 году).
7. Мечников Илья Ильич, биолог (избран в 1895 году).
8. Павлов Иван Петрович, биолог (избран в 1907 году).
9. Голицын Борис Борисович, физик (избран в 1916 году).
10. Капица Пётр Леонидович, физик (избран в 1929 году как национальный член, а не иностранный).
11. Вавилов Николай Иванович, генетик, географ, ботаник (избран в 1942 году).
12. Виноградов Иван Матвеевич, математик (избран в 1942 году).
13. Семёнов Николай Николаевич, химик (избран в 1958 году).
14. Энгельгардт Владимир Александрович, биохимик (избран в 1960 году).
15. Ландау Лев Давидович, физик (избран в 1960 году).
16. Несмеянов Александр Николаевич, химик (избран в 1961 году).
17. Колмогоров Андрей Николаевич, математик (избран в 1964 году).

18. Амбарцумян Виктор Амазаспович, астрофизик (избран в 1969 году).
19. Гельфанд Израиль Моисеевич, математик, биолог (избран в 1977 году).
20. Зельдович Яков Борисович, физик (избран в 1979 году).
21. Шафаревич Игорь Ростиславович, математик (избран в 1981 году).
22. Лифшиц Евгений Михайлович, физик (избран в 1982 году).
23. Гинзбург Виталий Лазаревич, физик (избран в 1987 году).
24. Арнольд Владимир Игоревич, математик (избран в 1988 году).
25. Халатников Исаак Маркович, физик (избран в 1994 году).
26. Баренблатт Григорий Исаакович, учёный в области механики (избран в 2000 году).
27. Абрикосов Алексей Алексеевич – физик (избран в 2002 году).
28. Синай Яков Григорьевич, математик (избран в 2009 году).
29. Сюняев Рашид Алиевич, астрофизик (избран в 2009 году).
30. Фаддеев Людвиг Дмитриевич, математик и физик (избран в 2010 году).
31. Громов Михаил Леонидович, математик (избран в 2011 году).
32. Новосёлов Константин Сергеевич, физик (избран в 2011 году как национальный член).

Как только не называли **Александра Меншикова** завистники: и свинопас, и пирожник, и конюх. А он, знай себе, взбирался по карьерной лестнице. «Баловень судьбы» не ведал устали в государственных делах, достиг невиданных высот, но в одночасье лишился всего. Некогда владелец городов и миллионов поехал в ссылку с 500 рублями.

Точная дата рождения Александра Даниловича неизвестна, равно как и его происхождение. По одной версии, он - сын крестьянина, попавший в «учение к пирожнику в Москву», откуда угодил на службу к **Францу Лефорту** (у которого, соответственно, его заметил **Петр I**). Согласно другим свидетельствам, Меншиков присматривал на царской конюшне, и в результате попал в услужение государю.

Впрочем, существует еще одна версия, появившаяся благодаря самому Александру Даниловичу. Ведь какими только титулами не обзавелся сподвижник Петра: герцог Ижорский, светлейший князь Римской империи и Российского государства, генералиссимус, верховный действительный тайный советник, рейхсмаршал, президент Военной коллегии, адмирал красного флага, санкт-петербургский губернатор, кавалер многих русских и иностранных орденов. Могущественный сановник не мог смириться со своим низким происхождением. Нелегко было игнорировать плохо скрываемые усмешки родовой знати. В итоге появилась версия о благородном происхождении светлейшего.

Из сфабрикованной генеалогии рода Меншиковых следовало, что он был связан родственными узами с королями или князьями ободритов (западные славяне, обитавшие в районе реки Эльбы), откуда берет начало род Рюрика, и далее указывалось, что в 1664 году, во время русско-польской войны, его отец Даниэль Меншик попал в плен, где женился на дочери уважаемого купца, русифицировал свою фамилию и имя и, став Даниилом Меншиковым, поступил на службу к царю Алексею Михайловичу.

Впрочем, как бы то ни было, но на службе у Петра I Александр Меншиков начинал свою карьеру с должности простого слуги, а потом уже государь взял его к себе в денщики.

Достоинства расторопного Алексашки или Данилыча (как называл его Петр I) царь оценил сразу. Меншиков стал неразлучен с государем. Более того, между ними установилась тесная дружба. Были бы силы выдюжить (двузильному царю надо соответствовать), а энергии, смелости и ума у Александра Даниловича хватало. Петру импонировали в друге деловитость, находчивость, талант организатора.

Меншиков первым стоял в списке волонтеров, поехавших с Великим посольством. Умело вместе с Петром он отесывал бревна на голландских верфях, бывал с государем на всех приемах. По возвращении в Москву Меншиков помогал в расправе над стрельцами.

Наделенный воинской отвагой, отчаянной храбростью, он стал участником всех сражений Северной войны (и не только), ему сопутствовала слава настоящего героя.

Победы

Блестящей была победа Меншикова над шведами в Польше в октябре 1706 года в битве у поселка Калиш, когда погибли почти все шведы (кроме тех, кто были взяты в плен с Мардефельдом) – около 5 тысяч человек, а русские отделались 80 убитыми и 320 ранеными. За эту победу царь наградил Меншикова тростью, усыпанной бриллиантами, ценой более 3 тысяч рублей (гигантская сумма по тем временам).

После измены Мазепы Петр, не надеясь на успех, поручил Меншикову предпринять попытку овладеть городом Батуриным (резиденция гетмана), где были сосредоточены огромные запасы провианта, пороха и артиллерии, куда уже спешили шведы с Мазепой. Меншиков все исполнил наилучшим образом: опередил шведов, взял Батурин, захватил все запасы, а остальное сжег.

Сыграл большую роль Александр Данилович и в Полтавском сражении, где командовал сначала авангардом, а затем левым флангом русской армии. Еще до ввода в сражение главных сил он разгромил отряд генерала Шлиппенбаха, пленив последнего. В момент столкновения армий обрушился на корпус генерала Росса, рассеяв его, что во многом предопределило победу русской армии. В этом сражении под Меншиковым было убито три лошади! Когда шведы бежали с поля боя (около 16 тысяч бойцов) Александр Данилович с 9 тысячами догнал их и принудил к капитуляции.

После Полтавы он стал вторым в России фельдмаршалом (первым был Шереметев), а его огромные владения увеличились еще на 43362 души. При торжественном въезде Петра в Москву (21 декабря 1709 года) Александр Данилович находился по правую руку самодержца, чем подчеркивались его исключительные заслуги.

Петр I во многих военных вопросах полностью доверял интуиции и расчетливому уму своего любимца. Почти все инструкции, директивы и наставления, которые царь рассылал войскам, проходили через руки Меншикова. Он был у Петра I как бы начальником штаба: подав мысль, царь нередко поручал разработать ее своему ближайшему помощнику, и тот находил способ воплотить ее в дело. Его быстрые и решительные действия вполне соответствовали кипучей энергии Петра.

В 1709–1713 годах Меншиков командовал русскими войсками в Польше, Курляндии, Померании, с 1714-го управлял территориями в Прибалтике, отошедшими от Швеции к России.

Помимо прочего он руководил строительством Санкт-Петербурга (стал первым губернатором столицы) и Кронштадта. В 1710-м ему было поручено завоевание Ливонии, которое он успешно осуществил.

Не следует забывать, что Меншиков стал одним из первых российских предпринимателей, заложивших ряд заводов и мануфактур, приносящих огромную пользу государству и немалый доход – самому князю. Многие из них существуют и по сей день. Он учреждал торговые компании, заботился о привилегиях для российских купцов в западноевропейских державах. Одним из первых в России Александр Данилович стал создавать предприятия по переработке сельскохозяйственного сырья и полезных ископаемых. Благодаря большому дипломатическому опыту Меншикова были нормализованы русско-австрийские отношения, прерванные в связи с делом царевича Алексея, и заключен союзный договор.

Александр Данилович научился говорить по-голландски и по-немецки но, якобы, до конца дней своих оставался неграмотным – мог подписывать только свою фамилию.

Непонятно как тогда он при этом умудрялся вершить дела столь огромного масштаба? Вряд ли, его выручали только незаурядный ум, цепкая память, способность держать в голове все детали многочисленных указаний, распоряжений и обязанностей. Конечно, у светлейшего (как и у других сподвижников Петра) была большая личная свита (в 1717 году она насчитывала 47 человек). Его канцелярию вели способные люди. Но вряд ли этого достаточно чтобы управлять Россией.

Меншиков уважительно относился к науке и ученым, на последнем году своего «царствования», пригласил в Россию молодого Леонарда Эйлера. Он был первым русским человеком, которого почтила высоким избранием в свои члены иностранная Академия наук. В октябре 1714 года Исаак Ньютон сообщил в письме об избрании Меншикова членом Королевского общества Англии.

«Пагубная страсть»

Светлейший князь любил роскошь: великолепный выезд, лучшая в столице кухня, огромный штат иностранных слуг. Его каменный дворец на Васильевском острове – дом петербургского губернатора – выделялся не только своими размерами, но и пышностью и великолепием. Этот дом называли также посольским – государь принимал здесь иностранных послов.

После царя Меншиков являлся самым богатым человеком в России. Его поземельный доход равнялся 1300 тысяч рублей в год. После опалы у него конфисковали 90 тысяч крестьянских душ, 6 городов, наличных денег 4 миллиона, да еще в заграничных банках – 9 миллионов, драгоценностей на 1 миллион и 105 пудов золотой посуды.

Неудержимая тяга к роскоши, стяжательству чуть не погубила Меншикова. Он брал взятки и воровал в таких количествах, что даже датский посол Юст Юль однажды заметил, что Меншиков «во всем, что относится до почестей и до наживы, является ненасытейшим из существ, когда-либо рожденных женщиной».

С этим соглашался и Петр I, который заявил: «Меншиков в беззаконии зачат, во грехах родила мать его и в плутовстве скончает живот свой, и если он не исправится, то ему быть без головы».

Меншиков не исправился. В 1710 году по приказу Петра специальная канцелярия под председательством Василия Долгорукого начала расследование по делу о незаконных махинациях Меншикова и других высокопоставленных чинов – они заключали подряды на поставку провианта по завышенным ценам и наживались на этом. На Меншикова был сделан начет в 144788 рублей – такую сумму он должен был вернуть казне. Следствие о подрядных махинациях еще не закончилось, как светлейшего обвинили в новом незаконном расходовании государственных сумм.

Самым неприятным стало Почепское дело, обвинялся он в захвате чужих земель и закрепощении украинских казаков, за которых вступился сам гетман. Пошли слухи о скором падении всесильного фаворита. Но Александр Данилович устоял и на этот раз.

Очередное объяснение между Петром I и Меншиковым произошло после возвращения Петра I из Персидского похода (1722–1723 годов), когда обнаружились очередные финансовые злоупотребления. Меншикову пришлось возратить в казну 200 тысяч рублей штрафа, чуть позже он лишился поста петербургского губернатора, на котором пребывал 22 года. Кажется, Александру Даниловичу не удержаться. Впрочем, смерть Петра I открыла дорогу к еще большей власти.

Еще в 1703 году сподвижник государя забрал у Шереметева Марту Скавронскую (будущую жену императора Екатерину), но очень скоро уступил ее Петру I. Екатерина на всю жизнь сохранила к Меншикову чувство искренней дружбы и глубокой признательности – она была обязана ему своим сказочным возвышением. К тому же Меншиков способствовал ее восхождению на престол после смерти Петра I в 1725 году.

«Полудержавный властелин»

Светлейший князь пользовался неограниченным влиянием на Екатерину I. С Меншикова сняли обвинение в незаконной трате казенных денег и отменили наложенный на него штраф в сотни тысяч рублей. Меншиков стал фактическим правителем страны. Однако ненадолго. Вскоре императрица серьезно заболела. Александр Данилович мог остаться без покровительницы. И он придумал новый ход: склонил императрицу дать согласие на брак наследника Петра Алексеевича (внука Петра I от царевича Алексея) с дочерью Меншикова Марией.

Светлейший не прогадал. Екатерина I умерла, на престол взойшел 12-летний Петр Алексеевич. Меншиков безраздельно руководил действиями императора. Однако нетерпение и излишняя настойчивость всесильного Александра Даниловича сыграло с ним злую шутку. Он просчитался, назначив известного интригана Остермана попечительствовать над Петром II. А тот культивировал в своем подопечном охлаждение и недоверие к будущему тестю. Тому содействовали и князья Долгорукие, приближенные тем же Меншиковым к государю. В результате император отвернулся от навязанной ему невесты и ее честолюбивого отца.

Утром 8 сентября 1727 года Александр Данилович получил императорский указ о домашнем аресте. При этом Меньшикову стало так плохо, что лекарь во избежание апоплексического удара вынужден был «отворить» ему кровь. Сей день ознаменовал крушение его карьеры.

Огромное состояние светлейшего конфисковали, а самого Александра Даниловича сослали сначала в Раненбург, затем в Березов. На дорогу он получил 500 рублей, которые израсходовал на покупку сельскохозяйственного инвентаря, плотницких орудий, семян, мяса и рыбы. Часть денег Александр Данилович раздал бедным. Вместе с восемью мужиками, оставленными ему в виде слуг, он срубил дом, рядом – деревянную церквушку и стал жить по-крестьянски. В опале он сохранил исключительное самообладание, оптимизм и стоически переносил тяготы, не обращаясь к властям с просьбами о помиловании.

Через полтора года самый близкий и талантливый сподвижник Петра I скончался.

Алекса́ндр Дани́лович Ме́ншиков (6 (16) ноября 1673, Москва – 12 (23) ноября 1729, Берёзов) – российский государственный и военный деятель, сподвижник и фаворит Петра Великого, после его смерти в 1725–1727 – фактический правитель России. Имел титулы Светлейшего князя Российской империи, Священной Римской империи и герцога Ижорского (единственный русский дворянин, получивший герцогский титул), первый член Верховного Тайного Совета Российской империи, президент Военной коллегии, первый генерал-губернатор Санкт-Петербурга (1703–1727), первый российский сенатор, полный адмирал (1726). Генерал-фельдмаршал (1709), при Петре Втором – генералиссимус морских и сухопутных войск (12 мая 1727).

23 августа 1714 г. Меньшиков в письме (на французском языке) к Ньютону обращается с просьбой принять его в члены Королевского Общества. Сохранилось три черновика ответного письма Ньютона Меньшикову, написанных его рукой на латинском языке. Один из этих черновиков в 1943 г. передан Королевским Обществом в дар Академии Наук СССР и в настоящее время хранится в Архиве Академии. Приводим перевод этого особо ценного для нас документа:

«Могущественнейшему и достопочтеннейшему владыке господину Александру Меньшикову, Римской и Российской империй князю, властителю Ораниенбурга, первому в Советах Царского Величества, Маршалу, Управителю покоренных областей, кавалеру Ордена Слона и Высшего Ордена Черного Орла и пр. Исаак Ньютон шлет привет.

Поскольку Королевскому Обществу известно стало, что Император Ваш, Его Царское Величество с величайшим рвением развивает во владениях своих искусства и науки и что Вы служением Вашим помогаете Ему не только в управлении делами военными и гражданскими, но прежде всего также в распространении хороших книг и наук, постольку все мы исполнились радостью, когда английские негоцианты дали знать нам, что Ваше Превосходительство по высочайшей просвещенности, особому стремлению к наукам, а также вследствие любви к народу нашему, желали бы присоединиться к нашему Обществу. В то время, по обычаю мы прекратили собираться до окончания лета и осени. Но услышав про сказанное, все мы собрались, чтобы избрать Ваше Превосходительство, при этом были мы единогласны. И теперь, пользуясь первым же собранием, мы подтверждаем это избрание дипломом, скрепленным печатью нашей общины. Общество также дало секретарю своему поручение переслать к Вам диплом и известить Вас об избрании. Будьте здоровы.

Дано в Лондоне 25 октября 1714 г.»

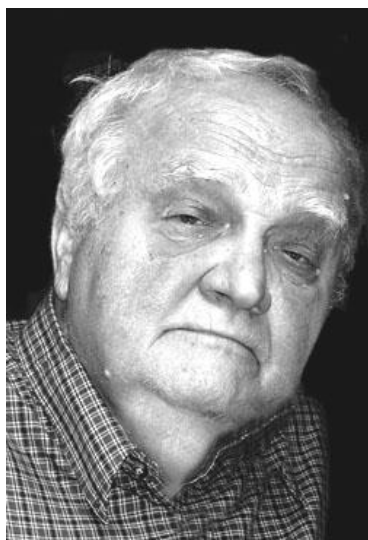
Таким образом, А.Д. Меньшиков стал первым русским членом Королевского Общества. Конечно, избрание это было чисто политическим актом, но знаменательным в двух отношениях. Оно выражало высокую оценку великой культурной революции, проводившейся в России на самых вершинах европейской культуры, оно вместе с тем свидетельствует, какое значение имел для новой России научный ореол Ньютона и Королевского Общества.

Черновик послания Ньютона к князю А.Д. Меншикову
(хранится в Архиве Академии Наук СССР)

Principi Potentissimo & maximo colendo, D^{no} Alexandro Menzicoff
Romani et Russi Imperij Principi, Domino de Oranienburg
Cesareae Majestati Primo a Consilijs, Equitum Stratego,
Devictarum Provinciarum Dynasti, Ordinis Elephantis nec non
Alti Nigregz Aquile & Epit. &c.
Isaacus Newton salutem

Cum Societas Regia dudum inolverit Imperatorem vestrum,
Craensem ~~esse~~ Majestatem, Artis & Scientias in Regnis suis
quam maxime promoveri, eunq; ministerio vestro, non solum in
rebus bellicis & civilibus administrandis, sed etiam in bonis literis
& scientijs propagandis, apprime ducari: maximo amoris suffut
fuimus gaudio quando Mercatores Angli nobis significarent
Excellentiam vestram, pro humanitate summa, & singulari suo in
scientias affectu, & erga gentem nostram amore, in corpus
Societatis nostrae cooptari, se dignari. Atq; eo pendera tempore caelestibus
nostris firmi, pro more, donec tempestas aestiva et autumnalis
proclineret, imposituri evanes. Sed hoc audito, senel amplius
convenimus ut Excellentiam vestram suffragijs nostris eligeremus,
id quod fecimus unanimi consensu. Et jam, ut primum caelestibus
nostris, ~~novos~~ ^{limitat} ~~procuratos~~ ^{novos} renovari ~~fecimus~~, electionem Diplomaticam
sub Sigillo nostro communi ratam fecimus. Societas autem
Secretario suo in mandatis dedit, ut transmissis ad vos Diplomate,
electionem vobis notam faceret. Vale

Dabam Londini
XXV Octob. MDCCXIV.



Вячеслав Всеволодович Иванов

Российский ученый, принадлежащий к очень ограниченному кругу мировой научной элиты. Лингвист, семиотик, антрополог, автор фундаментального труда «Индоевропейский язык и индоевропейцы» (совместно с Т.В. Гамкрелидзе), полиглот, освоивший несколько десятков языков, включая клинописный хеттский, которому была посвящена его предположительно потерянная ВАКом еще в 1955 году диссертация, сын Всеволода Иванова.

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ЧЕЛОВЕКА

Публичная лекция в «Новой газете» антрополога, лингвиста и семиотика Вячеслава Всеволодовича ИВАНОВА. Вопросы задает Юлия ЛАТЫНИНА.

Последние несколько лет из-за достижений генетиков и археологов наши представления о происхождении человека меняются с калейдоскопической быстротой. Об этом Юлия Латынина разговаривает с Вячеславом ИВАНОВЫМ - российским ученым, принадлежащим к очень ограниченному кругу мировой научной элиты. То, о чем идет разговор, это не то, что написано в учебниках, – это то, что прямо сейчас, на наших глазах, происходит в поле и лаборатории...

Он принадлежит к почти вышедшей сейчас породе ученых-энциклопедистов. В центре его интересов всегда стояла не просто узкая область (математическая, сравнительная, историческая лингвистика, как бы ни были значительны достигнутые им результаты), а человек как целое; используемые им знаковые системы, лежащие в их основе химические и физиологические механизмы, происхождение человека и его предназначение.

Об этом мы и говорим с Вяч. Вс. Ивановым. Собственно, эта серия лекций в форме диалога родилась просто из наших бесед, во время которых я спрашивала его самые важные, на мой взгляд, вещи на правах бывшей аспирантки, – а потом журналист во мне возобладал, и мне стало обидно, что я пользуюсь одна тем, что интересует многих. Еще раз хочу подчеркнуть: то, о чем разговор идет ниже, это – cutting edge. Это не то, что написано в учебниках, – это то, что прямо сейчас, на наших глазах, происходит в поле и лаборатории.

В настоящее время Вячеслав Всеволодович является директором Института истории мировой культуры МГУ и Русской антропологической школы РГГУ, преподает в университете Калифорнии в Лос-Анджелесе (UCLA) на кафедре славянских языков и литератур и участвует в программе индоевропейских исследований в том же университете.

– Когда появился первый человек?

– Это довольно сложный вопрос, потому что даты все время удревняются. Мы дату принимаем, а оказывается, что можно найти более раннюю. Так обстоит дело с отдельными признаками, скажем, прямохождением. Совсем недавно обнаружилось, например, что наши предки ходили прямо уже 4 млн лет назад.

– А почему они начали ходить прямо?

– Иначе говоря, почему человек антигравитационно построен? Это же вопрос не только хождения, но и расположения внутренних органов, головы и мозга. И другой технический момент – руки. До тех пор, пока эти конечности использовались для ходьбы, это затрудняло выполнение разных других задач. Не только работы, но и коммуникации, поскольку мы склонны думать, что жесты были первоначально одним из важных видов коммуникации. Телеологически понятно, зачем эволюции это нужно. А дальше вопрос, как рассматривать эволюцию. Если считать, что эволюция целенаправленная, – это идея биолога Берга...

– Еще Ламарка...

– У Берга (*труд Льва Берга «Номогенез, или Эволюция на основе закономерностей»* вышел в 1922 году. – Ю. Л.). Его подход ближе к представлениям, которые мы сейчас связываем с кибернетикой, но Берг изложил это в 20-е годы. А если говорить о философии, то скорее эта идея восходит к Канту: в какой степени нужна целесообразность?

У Канта есть идея целесообразности без цели. Это определение искусства по Канту. Искусство целесообразно, хотя у него нет цели. В каких-то вариантах теории эволюции ими можно пользоваться. Кстати, идеи эти под влиянием Берга развивались в Пражском лингвистическом кружке, потому что эволюцию языка тоже можно рассматривать как целенаправленную.

Так вот основное, что кажется интересным, то, что предок человека стал ходить прямо, – представляется целесообразным. Освободились руки, мозг оказался в вертикальном положении. Современная наука любит пользоваться словом «система», и человек – «это самая сложная система, которую мы знаем». Так однажды ответил мне Гелл-Манн, создатель теории кварков и учредитель Института сложных систем в Санта-Фе.

Если человек система – значит, отдельные части человека можно описывать с точки зрения вхождения в систему. Тем не менее причины, почему намечается цель, мы пока не знаем. Так что на самый интересный вопрос я вам ответить не могу.

– Но я, как презренный материалист, понимаю так: прямохождение появилось потому, что человек слез с дерева. Точнее: 7 млн лет назад или около того поднимается из воды Панамский перешеек, изменяется термохалинная циркуляция океана; джунгли, где жили предки человека, превращаются в саванну, так что, строго говоря, это не обезьяна слезла с дерева, а дерево убежало из-под обезьяны. И остался он, бедолага, посреди саванны в том же самом вертикальном положении, в котором свисал с ветки. Я вон, когда подтягиваюсь, нет-нет да и думаю: а ведь человек тем же захватом, которым он висел на ветке, стал брать камень.

– Насчет дерева – это не совсем ясно. Мы не очень хорошо понимаем самый ранний период развития антропоидов. Гиббоны очень близки к антропоидам, но гиббон гораздо ближе к лесным обезьянам, чем все дальнейшие высшие приматы, более близкие к нам.

– Мы о каком времени говорим? 7 млн лет, время расхождения с шимпанзе?

– Даже раньше. С орангутаном мы разошлись 11 млн лет назад, и хотелось бы знать, что было до 11 млн лет, а орангутан – не совсем лесной. Может быть, произошло разделение – одна группа предпочла деревья, а другая, наоборот, развила способность существовать не среди деревьев. Я думаю, что изменение климата имело значение, но это все-таки один из факторов. Я бы не хотел слишком его выдвигать. Надо думать о системе. Мы плохо знаем что бы то ни было о первоначальном предке, и на вопрос о причине я бы не спешил с ответом. Ведь если сформулирована цель, то тогда получается, что цель и была главной причиной. Это вполне серьезный вопрос. Если мы принимаем хоть сколько-нибудь серьезно антропный принцип, – что вся эволюция Вселенной предполагает создание разумной жизни, – то это важно понимать для постижения даже новейшей истории.

Существенно знать – какова возможная цель развития. Но это все гипотезы. Я не настаиваю. Самому же мне кажется, что у истории человечества есть цель, у эволюции человечества есть цель, и в таком случае эта цель должна учитываться, даже когда мы оцениваем отдельные причины развития.

При этом внешне причины могут выглядеть совершенно по-другому. Например, с точки зрения развития человечества, освоение космоса – это выполнение очень важной цели, о чем, собственно, и говорил Циолковский. *(Напомню, что основоположник космонавтики Циолковский был последователем русского философа Николая Федорова, полагавшего, что человечество должно физически воскресить всех мертвых. По легенде, Циолковский по поручению учителя занялся важной подсобной задачей, где их всех, воскрешенных, селить. – Ю.Л.)*

Но когда начиналось осуществление этой цели, многие из тех, кто на нее работал, рассматривали это как военную программу. Для тех, кто занимался строительством военных ракет, цели и причины выглядели не так, как для будущего историка.

– Ну это так даже в классической физике. Взаимодействие двух тел можно описывать с помощью ньютоновского уравнения, которое можно понять и так, что оно предполагает понятие причины, а можно – через принцип наименьшего действия – между двумя заданными точками тело движется так, чтобы действие было стационарным. Как сказал Фейнман: «Как оно находит эту траекторию, вынюхивает, что ли?»

– Это то, что говорил Нильс Бор, когда он считал, что любое явление нужно описывать как минимум двумя способами.

– Коль скоро причин, почему человек встал на ноги, может быть несколько, я не могу не спросить об одной гипотезе, которая мне кажется очень красивой, но совершенно нереальной. Согласно ей, человек встал на ноги, чтобы носить в руке плод, который он вручал самке, в обмен, разумеется, на спаривание. Так делают и некоторые обезьяны, и носить плод ногой не очень удобно. Меня, как от замороженного либертарианца, разумеется, очень привлекает идея, что процедура обмена зашита в сам процесс становления человека как вида. Но боюсь, что причина слишком нереальна.

– Я думаю, это входит в общее понятие жестов. Жесты, связанные с обменом, принадлежали к числу социально важнейших.

– Итак, мы начали ходить прямо как минимум 4 млн лет назад. А когда мы начали говорить?

– Давайте перед вопросом о речи поговорим о мозге. Мы видим, что произошло что-то поразительное, что привело к внезапному появлению не просто большого, а огромного мозга. Колоссальное соединение образующих нервную систему нейронов. Обычно называют число 10 в 15-й степени (10^{15}), но это только число самих нейронов. Они, однако, связаны разными путями, поэтому общее число нейронов и их комбинаций невероятно большое. В окончательном виде человек определяется именно этим, человек – это прежде всего мозг, как формулировал Декарт. Такая сложность мозга, возможно, возникла непосредственно до появления человека, 300–400 тыс. лет назад. По-видимому, голова неандертальца уже близка к такому мозгу.

– Так неандерталец – человек или нет?

– Одна из главных задач теперь – исследовать, когда и как развились лобные доли, отличающие человека (в том числе и от неандертальца) и делающие возможным логическое мышление и организацию поведения. Мы знаем последовательность нуклеотидов в геноме человека (я не хочу употреблять слово «расшифровка» – ведь мы не всегда знаем их значения) и знаем их последовательность в геноме неандертальца. Они очень близки.

– Но что мы знаем о поведении неандертальца?

– Мы знаем, что они занимались изготовлением не только каменных орудий, но и примитивных рисунков, которые мы называем орнаментами. Что это было, не ясно. Или у них уже были символы, которые мы не умеем читать, или это были просто орнаменты – вот как цветочки на занавеске. Очень трудно себе представить, что кто-то будет рисовать, не вкладывая в это смысл. Это потом символ вырождается в орнамент, а вначале он должен быть символом.

Трудность тут в том, что биологическая близость была настолько велика, что, вероятно, было общее потомство. И поскольку было смешение, то с какого-то времени общие черты человека и неандертальца могут как раз объясняться воздействием людей. И биологическим, и культурным. Известно, что пигмеи в Южной Африке и шимпанзе могут подражать друг другу. Люди и неандертальцы жили рядом. В таком случае почему орнамент, который нарисовал неандерталец, не мог быть подражанием символу, нарисованному человеком?

Есть две области, в которых бесспорно, что очень древние люди и неандертальцы жили вместе. Это Европа, которую человек заселил очень поздно, около 40 тыс. лет назад, и Южный Алтай.

– Так там же жил и денисовец. (Денисовский человек был найден в Денисовой пещере на Алтае несколько лет назад экспедицией под руководством директора Института археологии и этнографии Сибирского отделения РАН Анатолия Деревянко. Геном его был секвенирован в Лейпцигском институте эволюционной антропологии под руководством шведа Сванте Пезбо в 2008 году. – Ю.Л.)

– Как раз очень большой спор об этом идет, потому что денисовцы – это еще одна группа, и они походили на человека. От денисовца мы пока имеем часть пальца и зуб. Но этого достаточно для генетической реконструкции, и по этой генетической реконструкции денисовцы очень близки и к людям, и к неандертальцам, но это не те и не другие. Но вот в чем дело: в этой же пещере до и после денисовца также жили неандертальцы.

– Так, собственно, мой вопрос. Денисовцы и неандертальцы – это побочные группы или это часть нашего генеалогического древа?

– Это вопрос, который вызывает большие споры. Я вам, если можно, изложу теорию самого Деревянко. Что мы сейчас знаем? Человек появляется вроде бы 200 тыс. лет назад в Эк-

ваториальной Африке, к югу от экватора, это примерно на 400 тыс. лет позже, чем ранние неандертальцы. Неандертальцы и люди, очевидно, имеют общее происхождение, их общий предок неизвестен, но он очень сильно отличается от шимпанзе. Жил этот общий предок, если верить молекулярным часам, около 1 млн лет назад, хотя это может очень сильно удревниться.

– **И этот общий предок – это также общий предок денисовца и *homo floresiensis*.**

– Да, Деревянко предлагает считать четыре линии (или даже пять с восточно-азиатским человеком, отличным от алтайского), хотя с *homo floresiensis* всё пока очень не ясно.

– **Поскольку большинство наших читателей-сапиенсов не знают, что у них был кузен-хоббит, расскажите о нем поподробнее.**

– *Homo floresiensis* – это очень неожиданное открытие на острове Флорес в западной части Индонезии. (*Homo floresiensis* был раскопан в 2003 году командой археологов под руководством Майкла Морвуда. Попытки секвенировать его геном пока неуспешны, в первую очередь из-за того, что высокие экваториальные температуры приводят к очень плохой сохранности ДНК. Мамонтов секвенировать легче. – Ю.Л.)

Жил он в относительно ограниченной области, и что важно, жили в этой области также и люди. Жил он там как минимум уже 100 тыс. лет назад, – может быть, и раньше, и вымер, – вероятно, – около 18 тыс. лет назад.

– **При этом на острове есть довольно подробные легенды о «маленьких людях», которые дожили чуть не до XVI века, почти до прихода европейцев.**

– Легенды о маленьких людях очень популярны и на Кавказе. Их там очень много. Возможно, они оправданы, как и легенды про снежного человека. Очень вероятно, что снежный человек – это дениовец.

Самое главное отличие *homo floresiensis* – они были устроены как современные непатологические карлики. Есть карлики патологические, у которых нарушено нормальное функционирование генома, а есть карлики-лилипуты, которые представляют собой уменьшенные копии. Почему мы думаем, что *homo floresiensis* был уменьшенной копией? Он умел делать каменные орудия так же хорошо, как его соседи-люди. Даже если он заимствовал это у людей, ну и что – японцы же тоже многое не изобрели из того, что копировали, – это никак о них не говорит плохо.

Есть ряд интересных открытий, связанных с теми генами, которые определяют размеры черепа. На сколько можно уменьшить мозг, чтобы при этом сложность его и все его богатство оставались человеческими? Есть две аллели, которые могут приводить к такому сильному уменьшению, и похоже, что мозг *homo floresiensis* уменьшался так же, как это происходит у человека. При этом у человека размер мозга связан с особенностями языка, а именно – имеет язык музыкальные тоны или не имеет. На территории земного шара распространение тоновых и нетоновых языков более или менее подчиняется географическим закономерностям.

Тоновые языки – это Африка к югу от экватора и часть территории Юго-Восточной Азии.

– **И Китай.**

– Видимо, в Китае языковые тоны возникают поздно и именно под влиянием южных языков. Это я все к тому, что по этой тоновой гипотезе деление на тоновые и нетоновые языки связано с геном *Microcephalin*.

– **Грубо: если у тебя маленький мозг, ты поешь, а не говоришь.**

– Это два независимых друг от друга следствия одного гена. И поскольку не ясно, когда он мутировал, то с *homo floresiensis* все очень не ясно. Может оказаться, что он получился в результате вторичных мутаций.

– **Уточню: как наш хоббит связан с пигмеями?**

– Никак. О пигмеях и группах, с ними связанных, – чуть позже.

– Итак, я надеюсь, что наш читатель усвоил, что не было одного-единственного *homosapiens*, как нас раньше учили. Был человек, неандерталец, денисовец и хоббит, а может, и еще кто-то, кого еще не выкопали, и IQ их был сопоставим. То есть – что у нас была счастливая большая семья с множеством кузенов, которых мы то ли вытеснили, то ли съели. И – как говорится в моем любимом романе «Речные заводы» (к сожалению, это также любимый роман Мао Цзэдуна).

Говорим об общей прапрабабушке человечества и нашем происхождении, начинающемся со смешения основной североафриканской группы с денисовцами, папуасами и неандертальцами.

Нас всегда учили, что *homo sapiens*, такой умный, был один. Это не так. Был как минимум еще неандерталец, денисовец и хоббит (*homo floresiensis*).

Причем картина создается буквально на наших глазах. *Homo floresiensis* раскопан Майклом Норвудом в 2003-м, геном его не секвенирован до сих пор (ДНК разложилась из-за высоких температур Индонезии). Денисовский человек раскопан Анатолием Деревянко в 2008-м.

А в мае 2010 года ученые института эволюционной антропологии им. Макса Планка в Лейпциге (того же, который секвенировал геном денисовца) опубликовали данные о расшифровке генома неандертальца: оказалось, что люди и неандертальцы скрещивались, и в геноме современного человека 1–4 % неандертальских генов.

При этом неандерталец вымер в Европе около 25 тыс. лет назад, единственный раскопанный денисовец имеет возраст 40 тыс. лет, а *homo floresiensis* жил как минимум до 12 тыс. лет назад. Они жили в тех же местах, что и сапиенс, скрещивались и соперничали. И после того как читатель усвоил, что у нас была счастливая большая семья с множеством кузенов, которых мы вытеснили и съели, давайте и перейдем к этому процессу, который политкорректно называется расселение человека.

– Я начну с традиционной схемы. А потом изложу ту версию происхождения и расселения человека, которая следует из открытия денисовца. Это сейчас модная тема научных споров, и то, что я буду говорить, – это попытка сложить вместе разные взгляды.

150 тыс. лет назад жила всех нас общая прапрабабушка.

– **Митохондриальная Ева.**

– Да, и это важное уточнение. Мы обнаруживаем эту прапрабабушку по митохондриальной ДНК, то есть по той части ДНК, которая связана с митохондриями, которые являются лишь частью клетки. Поскольку эта гипотеза не касается всего генома, она не исключает, что происходили смешения. Но сколько бы ни было смешений, была прапрабабушка. Мы знаем, что у нее был человеческий геном. У нее было почти все, что мы видим у современного человека, с очень маленькими изменениями. Раньше думали, что вообще без изменений, но теперь есть данные, что нет, некоторые изменения все же произошли. Сейчас геномы в разные периоды и у разных людей в подробностях различаются друг от друга.

– На минуту об изменениях. Как я понимаю, у современного человека мозг несколько меньше, чем у его предков. Самый большой мозг у нас был 41 тыс. лет назад. Мы поглупели?

– Мы пока очень плохо понимаем внутреннюю структуру мозга. Это тот же вопрос, что с *homo floresiensis*: как увеличение соотносится со структурой, или это просто изменение проекции.

– И второе. Когда появилась белая кожа? Прабабка-то была негритянкой.

– С белой кожей тоже все очень неясно. Мутация, которая приводит к появлению белокожих блондинов, нередко может происходить у современных людей, и не исключено, что это происходило параллельно несколько раз.

– Возвращаемся к прабабушке.

– У прабабушки был ген *FoxP2*, который у разных животных управляет разными видами общения. У птиц – пением, у мышей – ультразвуком, которым они общаются с мышатами, у летучих мышей – радиолокацией.

– Но он есть и у шимпанзе.

– Да, но у него старый тип, который у человека и неандертальца очень сильно поменялся химически, в смысле белка. У неандертальца *FoxP2* тоже представлен в не-шимпанзейной форме. Вопрос, на который мы пока не умеем ответить: а что, этот ген регулирует только звуки?

Данных в пользу того, что он нужен для жестикуляции, нет. Как регулировалась древняя развитая жестикуляция, мы пока не знаем. Это очень важно, потому что у всех антропоидов явно была жестикуляция, связанная у них с тем, что похоже на наш разум, и выкрики, похожие на междометия. Мы знаем, что эти выкрики, условно говоря, «ай», «ой» у гориллы и шимпанзе связаны с повторяющимися событиями в жизни коллектива – с опасностью и едой. У человека такая функция междометий отсутствует.

– Уточню: а галка, когда кричит, она описывает ситуацию или свои чувства? Она кричит: «мне плохо» или «это опасность»?

– Леонид Крушинский считал, что птицы используют звуки для рассудочных высказываний. Галка дает нам сигнал, что согласно ее наблюдениям, сейчас дело плохо. Во всяком случае, он доказал, что ворон ворона называет отдельным именем.

Довольно давно выявлено, что у всех высших животных (млекопитающих) есть более или менее одинаковое количество сигналов. Оно составляет несколько десятков. Самый большой вопрос касается китов и слонов, с их огромным мозгом. Про китов мы знаем, что у

них есть очень длинные песни, которые они повторяют в течение года. То есть они запоминают длинные «песни». При этом у китообразных, как и у людей, есть разделение функций двух полушарий. Видимо, это связано с тем, что они живут в двух стихиях – воде и воздухе. Дельфин, чтобы жить в воде, половину мозга выключает и спит другой половиной. Человеку до таких фокусов очень далеко, хотя, видимо, приемы медитации направлены на то, чтобы выключить левое полушарие. А сны мы видим правым полушарием, и оно занято музыкальным и живописным творчеством. Шнитке говорил, что он после болезни лучше пишет музыку. Говорил он при этом из-за инсульта очень плохо.

– Мы забрались немного в сторону от речи, но à propos, когда полушария человека стали отличаться друг от друга? Это ведь не менее важный признак, чем прямохождение.

– Очень рано. В России был замечательный ученый, Вероника Кочеткова. Она написала посмертно изданную книгу «Палеоневрология» (1973 год издания. – Прим. Ю.Л.). Она открыла, что можно довольно много сказать о работе мозга по сохранившимся черепам. Когда мы говорим, кровеносные сосуды активизируются в тех областях мозга, которые нам для этого нужны, и это отпечатывается на черепе. По данным Кочетковой, у древних гоминид задолго до миллиона лет уже были следы в точности тех сосудов, которые у современного человека заняты речью. Правда, есть американская работа нескольких авторов, которые экспериментально исследовали, что именно происходит с американскими глухонемыми, когда они говорят языком жестов. Они пользуются левым полушарием. То есть доминантное полушарие, отвечающее за речь, по-видимому, выделилось очень давно, но мы не знаем, в какой степени эта речь была языковой, а в какой – жестовой. Но на каком-то этапе победила звуковая речь.

Я понимаю это так. На самом раннем периоде было несколько десятков сигналов, в число которых входили и жесты. Некоторые, как, например, оскалывание зубов, не требовали даже участия рук. Сигналов тогда было мало: не так уж много частей тела, которыми можно двигать, если стоишь на четырех лапах, а хвоста нет.

Язык возник как комбинация жестов и выкриков, которые превратились в фонемы. Эта идея принадлежит Роману Якобсону и Клоду Леви-Строссу: что человек от предков отличался тем, что он взял унаследованную от предков систему сигналов и надстроил над ней свой этаж: каждый звуковой сигнал при этом потерял смысл, но послужил строительным материалом для нового этажа.

– Но когда это произошло и говорил ли неандерталец, мы не знаем?

– Довольно подробно изучена одна английская семья, у которой FoxP2 есть в «испорченном» варианте. Этой семье свойствен дефект речи, и, кроме того, дефект верхней губы. По этому поводу существует очень большая полемика, Либерман бурно доказывал, что у неандертальца (имевшего, как мы теперь знаем, как и человек разумный, этот ген в форме, двумя мутациями отличавшейся от того, что у шимпанзе), нет системы полостей (гортани, ларинкса и фаринкса), которая у нас формирует гласные. У неандертальца нет нашего подбородка, это тоже важный элемент формирования полости рта. Согласные он мог произносить. У него мог быть язык из согласных с малым количеством гласных, что встречается и в человеческих языках.

– У койсанской расы. Бушменов и готтентотов.

– Их главная особенность – в согласных, таких как «п» со щелчком губ.

– Опять не могу не перебить. Мы говорим о речи, и это в любом случае довольно поздний феномен. Давайте очень кратко вернемся к орудиям труда, которые, по Энгельсу, и сделали из обезьяны человека. Олдувайский человек изготавливал каменные орудия 2,6 млн лет назад, а ашельский – 1,75 млн лет назад. У него разум был?

– Какие-то элементы разума есть у всех животных, начиная с пчел. Разум – это нечто, что позволяет нам делать умозаключения. Мы получаем очень большую информацию и умеем ее обрабатывать так, чтобы она нас не задавила. Пчела это тоже умеет.

– Э нет, насчет пчелы – это слишком общо. Вот есть каменные орудия – 2,6 млн лет, и есть речь – 200 тыс. плюс-минус. Это чудовищный разрыв. Для олдувайского орудия нужна тонкая моторика, которой у обезьяны нет, для ашельского – вообще превосходная, что австралопитек Люси делала этими своими руками с отличной моторикой? Она не только делала орудия, но и разговаривала жестами. И если первый язык был язык жестов, то насколько отличались процессы, происходящие в мозге при изготовлении скребка, от процессов, происходящих при общении руками? Камни она обрабатывать умела, умела ли она мыслить?

– Есть много животных, которые пользуются орудиями, – бобры к примеру. Чем человек отличается от животных? Тем, что он надстроил над этим этажом еще один этаж, понял, что камнем можно ударить не по ореху, а по камню. Мы склонны считать, что сама эта идея уже и есть мысль. Идея, что можно ударить по камню с отсроченной целью.

– Итак, возвращаясь к речи и к прабабушке.

– Прабабушка говорила фонемным языком. У нее звуки из ограниченного числа выкриков превратились в элементы слов. Похоже, что этот язык был тоновый, то есть слова в нем различались не только фонемами, но и тонами. Это была система, немножко отличная от наших языков. Думаю, что бабушка очень хорошо пела.

– А это еще один вопрос. Как связана речь с музыкой?

– Музыка связана с несловесной речью, которая поется по слогам. Вполне может быть, что бабушка пела не только песни, но и существенные высказывания, особенно те, которые надо запомнить, потому что известно, что песня лучше запоминается и сохраняется в правом полушарии при поражении левого доминантного полушария мозга, специализирующегося у правшей на звуковой речи. Человек очень долго излагал знания, накопленные предшествующими поколениями, в стихах, которые пелись. «Веды» пелись.

– Грубо говоря, когда человек научился писать, он разучился петь.

– Примерно. Когда-то все были, как Паваротти. Мы считаем сейчас уникальными такие способности, которые были у всех. Бабушка умела и петь, и говорить, а мы петь разучились.

– Но если прабабушка петь умела, а неандерталец – нет, ведь с гласными у него было плохо, то получается, что у него хуже, чем у человека, обстояло дело с долговременной памятью культуры?

– Да, это могло быть одним из главных преимуществ человека – создание внешней памяти. Когда мы поем, это уже ноосфера, вынесенная за пределы нашего организма.

– Еще что было важным отличием бабушки?

– Я думаю, самое важное отличие было то, что других бабушек и дедушек было мало, и они не имели возможности друг к другу плохо относиться. Они были очень нравственными – иначе бы они не сохранились. «Не делай другому то, что не хочешь себе» – бабушка знала еще тогда.

Еще одна важная идея состояла в том, что общество разделилось на группы, внутри которых браки не разрешались. Напомню, что в том месте, где родилась бабушка, было довольно много урановой радиации из-за естественного уранового реактора, и важно было не передать вредные мутации. А мутация очень плохо реагирует на браки с близкими родственниками. Шредингер¹ как-то пошутил: «Очень плохо, когда близкие родичи женятся друг на друге, особенно если один из них работает в рентген-кабинете». Эти первобытные люди построили социальную структуру, разделив общество по брачным классам. Это одна из самых важных для человека идей. По-видимому, это закрепляется в детском представлении, что есть «наши» и «не наши». Когда-то, когда я занимался кетами в Западной Сибири (на Енисее), я попросил группу кетов сказать мне первую фразу на кетском, которая пришла им на ум. И комсомолец 27 лет выпалил: «Никогда не бери жену из своей половины племени».

– И когда это происходит? Когда начинается дуальная структура общества?

– Это все происходит вскоре после бабушки.

– Какие еще важные изменения происходят после рождения бабушки?

– Генетики утверждают, что было еще одно изменение, которое могло коснуться языка. 110 тыс. лет назад, видимо, внутри Африки выделилась группа самого южного населения, которые использовали щелкающие согласные (кликсы) в качестве полноценных фонем. Более нигде в мире этого нет.

– Койсанская раса. Бушмены и готтентоты.

– Да. В этом смысле, когда в ЮАР был апартеид, это было политическим выражением самого раннего деления человечества. Сейчас там апартеид наоборот, и это страшная вещь. Этим в США заниматься нельзя. По-видимому, когда образуются две группы, возникает эта гигантская опасность, что одна группа может начать воевать против другой.

– Так в ЮАР же зулусы. Они же высокие, а бушмены – низенькие.

– Зулусы испытали на себе сильнейшее влияние койсанской расы. У них даже есть щелкающие языки.

– Еще раз погодите. Я в свое время очень удивилась, узнав, что Африка населена тремя расами, генетические различия между которыми не меньше, а как мы сейчас выяснили, и больше, чем, скажем, между китайцем и шведом. Это койсанская раса на юге Африки, они темно-коричневые, маленькие, но изящные, и у женщин сильно выражена стеатопигия: задница у них очень объемная. Это капоидная раса – пигмеи, живущие разбросанными группами в дождевых лесах. Пигмеям хуже всех, они недавно жаловались, что в Конго во время гражданской войны на них охотились, как на диких зверей, и ели, причем все стороны конфликта. Во многих африканских странах бедолаги пигмеи не

¹ Австрийский физик-теоретик, один из создателей квантовой механики. Лауреат Нобелевской премии по физике (1933). В книге «Что такое жизнь?» Шрёдингер обратился к проблемам генетики, взглянув на феномен жизни с точки зрения физики.

имеют статуса граждан. Ну и собственно негроидная раса – высокие, статные, о которых муза Гитлера Лени Рифеншталь, большая поклонница физического совершенства, снимала фильмы к концу жизни. Вот я думаю, что большинство наших читателей не знает, что Африка населена тремя различными расами. Какое у них соотношение?

– Как лингвист я следую классификации Джозефа Гринберга, принятой большинством африканистов. Койсанская семья, возможно, древнейшая, сохранилась на юге Африки. А севернее есть две основные макросемьи: нигер-конго и нило-сахарская, возможно, они связаны друг с другом, но не с койсанской. Пигмеи лингвистически недостаточно изучены, но можно считать, что первоначальные языки пигмеев сохранились только в виде небольшого числа оставшихся (субстратных) слов – все их племена перешли на языки соседей. Были ли они по языку связаны с койсанскими, пока точно не выяснено.

– Но к нам и к дальнейшей экспансии человека койсанская раса отношения не имела.

– Нет. Совершенно определенно южная часть Африки развивается очень отлично от северной. Это поразительная устойчивость. Группа отделилась 110 тыс. лет назад и дожила до сих пор.

– Вернемся от бушменов к нашим предкам. Когда они выселились из Африки?

– Я сначала изложу стандартную точку зрения, которая господствовала лет 20 назад. Согласно ей, человечество попыталось выйти из Африки около 100 тыс. лет назад, через Синайский перешеек, но его не пустили неандертальцы. Они были, видимо, сильнее. В итоге человек покинул Африку в районе Эфиопии и переправился в Аравию. Напомню, что был ледниковый период, воды было гораздо меньше, но она была. Похоже, что они передвигались как раз по воде. Сейчас произведено обследование Южной Аравии и видно, что когда эти первые поселенцы пришли из Африки, они двигались вглубь Аравийского полуострова по руслам тогдашних рек.

– Когда?

– 50–60 тыс. лет назад.

– Так что, они вышли из Африки и за 10 тыс. лет добежали до Австралии?

– Да, около 40 тыс. лет назад они шли или плыли очень быстро, вдоль побережья. Они дошли до Индии и до Юго-Восточной Азии, которая тогда составляла один континент с Индонезией. Там в этот момент жили денисовцы, т.е. те, кто родственен позднейшим жителям Денисовой пещеры. Согласно изысканиям группы Сергея Старостина (недавно умерший крупнейший ученый-лингвист, глава Московской школы компаративистики, ученики которого в сотрудничестве с упомянутым выше институтом Санта-Фе продолжают реализовывать проекты The Tower of Babel, The Global Lexicostatistical Database. – Прим. Ю.Л.), многие языковые семьи Евразии можно объединить в макросемьи. Индоевропейская, алтайская и уральская группа языков, а также дравидийские в Индии и картвельская на юге Кавказа объединяются в ностратическую макросемью, открытую нашим ученым Илличем-Свитычем, к ней примыкает и афразийская (семито-хамитская) семья, а северокавказская, енисейская и тибето-китайская – в сино-кавказскую макросемью. В конечном итоге все эти семьи восходят к одной, сверхогромной бореальной, которую считали лет 20 назад языковой семьей всех выходцев из Африки. Так вот, в Новой Гвинее сохранилось несколько больших групп языков совершенно другого типа. Похоже, что это – денисовцы или их близкие родственники. Денисовцы выселились из Африки раньше человека, от Индонезии дошли до Янцзы и возможно поднялись по течению вверх. В конечном итоге они заселили Алтай. Похоже, что первоначальное население Юго-Восточной Азии и папуасы были денисовцами. Получается, что со-

временный человек в России – это результаты смешения выходцев из Африки с денисовцами и что население Европы тоже очень сильно смешано. Выходцы из Африки дошли до Юго-Восточной Азии, там смешались с денисовцами и вернулись к западу Евразии в Европу. До смешения с денисовцами они не могли одолеть неандертальца.

Наша старая точка зрения была такая, что все гомогенно. Оказывается, ничего гомогенного не было. Было скрещение. Современная ноосфера – наша разумная деятельность – это продолжение этой культуры, построенной из смешения основной североафриканской группы с денисовцами, папуасами, и потом с неандертальцами. То есть разумность истории заключается в том, что необходимы разные группы, которые должны смешиваться.

– Австралию для европейцев открыл Джеймс Кук в 1770 году. Плыл он на очень приличной трехмачтовой посудине водоизмещением 368 тонн. В честь этой посудины – Endeavour – потом назван командный модуль космического корабля «Аполлон». И вот удивительное дело: homo sapiens добрался до Австралии за несколько сотен тысяч лет до Кука, причем без всяких бизаней и пушек. Когда и как это произошло?

– Мы, лингвисты, довольно давно пришли к выводу, что почти все языки Австралии, кроме самого севера, безусловно, родственны, и поэтому можно установить общеавстралийский язык. Это делает Австралию уникальной – для всех континентов свойственна большая пестрота. Все эти языки – сравнительно позднего расселения: 40 тыс. лет назад. Но есть несколько североавстралийских языков, которые, видимо, восходят к предыдущей волне и довольно близки к одной из макросемей, которые есть на Новой Гвинее. Новая Гвинея – это удивительно интересный остров.

– Я напомним нашим читателям, что в тот момент, о котором мы ведем речь, 40 тыс. лет назад и раньше, островом он не был. Уровень моря в пик оледенения был на 120 м ниже нынешнего, и Новая Гвинея вместе с Австралией была частью суперматерика Сахул, причем береговая линия шла от севера Новой Гвинеи к северу Австралии, как бы перпендикулярно цепочке островов, соединявших Сахул с Евразией, – существенная деталь для расселения.

– Да. Так вот, на теперешней карте эта макросемья находится в северо-восточной части Новой Гвинеи. Вообще на Новой Гвинее удивительное разнообразие языков. Покойный Старостин пришел к выводу, что там есть несколько макросемей. То есть не просто семей языков с древним общим предком с возрастом от 20 до 40 тыс. лет, а еще более древних макросемей. Они очень древние, их несколько, и они очень не похожи на то, что есть во всем остальном мире.

– Чтобы читатель представлял себе, насколько это необычно, я хочу, чтобы вы напомнили ему, сколько всего языковых макромакросемей в мире, не считая Новой Гвинеи.

– Их проще перечислить: есть ностратическая макросемья, в которую входят в том числе индоевропейские, афразийские (то, что мы раньше называли семито-хамитские, возможно, что они отделились от ностратического праязыка раньше всех остальных его диалектов), картвельские, дравидийские и уральские языки. С ностратической можно сближать синокавказскую макросемью, которая нам будет особо интересна, когда мы перейдем к Америке, и еще одна довольно большая семья языков на Крайнем Севере – это палеоазиатские языки (например, юкагирский и нивхские: их иногда теперь признают дальними родственниками ностратического). Все эти три большие семьи объединяются, по Старостину, в одну сверхбольшую бореальную макромакросемью. Раньше мы думали, что бореальные языки – это более или менее и есть языки всех выходцев из Африки, которые перешли в Европу. Другие

макросемьи – это австроазиатская и австронезийская, объединяемая с австротайской, – это все языки Тихого океана и часть (но не все) языков Юго-Восточной Азии. Плюс – три африканских макросемьи. Койсанская макросемья, отделившаяся, как я говорил, 110 тыс. лет назад, нигер-конго и нило-сахарская.

– Мы насчитали восемь макросемей – ностратическую, синокавказскую, палеоазиатскую, австроазиатскую, австронезийскую и три африканских – и это по всему миру. И вот получается, что еще несколько макросемей сосредоточено на Новой Гвинее?

– Да. На этом острове – 1000 языков. То есть из общего мирового числа ныне существующих 6000 языков шестая часть находится на этом острове. И они, по-видимому, входят в несколько макросемей. И крайне интересное открытие, сделанное генетиками: а именно обнаружено, что денисовцы по своим генетическим свойствам ближе всего к папуасам Новой Гвинеи. При этом на Новой Гвинее есть и представители австронезийских языков.

И сейчас картина становится более понятной, но и более сложной. Складывается впечатление, что заселение Новой Гвинеи и северной части Австралии произошло не 40 тыс. лет назад, как гласит классическая теория, а на несколько десятков тысяч лет раньше. Когда люди начали переселяться из Африки, первая большая волна дошла до Новой Гвинеи и Северной Австралии, которая стала естественной природной преградой для расселения.

– И следует подчеркнуть, что, поскольку дело было около 70 тыс. лет назад, они плыли вдоль непрерывной береговой линии, которая простиралась от Индии до т.н. Сундаланда – это Индокитай, который переходил в Суматру и Яву. Потом шла цепочка островов от Бали до Тимора, которые были куда крупнее, чем сейчас, так что люди, когда плыли, в хорошую погоду всегда видели перед собой следующую землю. А потом уже они приплыли в Сахул и расселились по всей северной его части.

– Да. Следующие волны перекрыли это древнее расселение. Мы только сейчас, когда обнаружены денисовцы и установлена их генетическая связь с папуасами, понимаем, что было как минимум две большие волны расселения. Это выясняется совсем недавно, буквально в последние месяцы. Выясняется, что часть населения Вьетнама относится к той же генетической группе, что и денисовцы, и папуасы Новой Гвинеи.

– Если часть языков Новой Гвинеи восходит к денисовцу, получается, что денисовец хорошо говорил? (Это важно, поскольку относительно неандертальца есть сомнения.)

– Да, на сегодняшний день это выглядит так, поскольку мы уже столкнулись с тем, что нет единства и есть несколько волн расселения по Азии. Их не меньше, чем три или четыре.

Может быть, и больше, если в каком-то месте Новой Гвинеи или Азии обнаружится не оприходованное генетиками и лингвистами образование. Но пока получается, что расселение в тех местах начинается около 100 тыс. лет назад.

– И это не *homo sapiens*.

– Нет, это боковые родичи, а *homo* в теперешнем понимании – это продукт смешения всего того, что мы описываем. Первоначально же было несколько групп. Основные споры – в частности, споры между нашей группой генетиков и антропологов, работающей с Деревянко, и многими американскими антропологами – это степень близости всех этих групп к *homo*

sapiens. Некоторым антропологам очень хочется считать, что homo sapiens и родственные ему выходцы из Африки достаточно близки друг другу. Более реалистическая точка зрения, на мой взгляд, состоит в том, что они различны.

– Это, мягко говоря, политически чувствительный вопрос. Сейчас расист вам скажет: «Ну вот, говорили же вам, что папуасы – не люди!»

– Да.

– Тут важный вопрос. Мы все в школе читали, что выходец из Африки был охотник-собиратель. И, в общем, складывалась такая картинка расселения: они охотились на мамонта, мамонт уходил, они шли за ним, так и расселялись. А теперь выясняется, что они плыли. И они приставали к берегу, основывали поселения, ели там, жгли костры, оставляли кости, посуду, рисунки, причем делали это там, где сейчас 120 метров воды, да еще и грунт в море вынесло. Есть ли какой-то шанс раскопать что-то – ну в Индийском океане или у побережья Суматры?

– Пока морская археология – это почва для красивых статей. Мы не можем толком раскопать даже Средиземное море. Есть раскопки в Александрии, есть раскопки Черного моря в его северной части. Поскольку, как мы знаем, Черное море было пресным озером...

– И стало морем, прорвав Босфор за 5600 лет до н.э.

– Похоже, что это и был Всемирный потоп. Так вот, даже в таком близком бассейне очень мало найдено. Нужны очень большие технические капиталовложения. Один английский университет построил глубоководную подводную лодку для такого рода исследований. Выяснилось, например, что внутри Черного моря есть до сих пор поток пресной воды, текущий, как река. В общем, если бы в мире была нормальная ситуация и вместо того, чтобы разными способами бомбить Ближний Восток, мы вложили бы деньги в подобные исследования, мы бы сразу много узнали про историю человечества.

– А на чем они плыли?

– Есть разные предположения. Никаких следов ранних кораблей нет. На Андаманских островах есть очень интересная маленькая группа населения, которая близка старым волнам расселения. Там до сих пор известен такой способ передвижения по морю: они вырывают из земли кустарник, эта куча бросается в море, и люди плывут за ней, как за спасательным кругом. Плывают, но как бы имеют точку опоры. Как будто бы таким образом они до сих пор проплывают очень большие расстояния. Если они плыли именно так, то никаких следов этого нельзя будет обнаружить: кусты-то ведь не обработаны человеком. Вполне возможно, что они двигались по побережью и руслам рек, и по руслам могли продвинуться довольно далеко в глубь Китая. Это я к тому, как денисовцы появляются на юге Сибири. На первый взгляд это кажется очень странно: прийти в Сибирь со стороны Индии и Средней Азии очень трудно. Для этого надо пересечь гигантские горные хребты, Гималаи и Памир. Если они двигались по руслу Янцзы и далее вверх, это объясняет такую загадку – почему Новая Гвинея связана с нашим Алтаем.

– Есть какое-то предположение, как они могли быть социально устроены?

– Не знаю. Мне кажется, чтобы организовать такое направленное движение, тут основной вопрос, не как было устроено общество, а как была устроена разведка. Как эти люди, которых мы считаем первобытными, могли понять, каким образом они могут двигаться? У них

же не было командующего, который имел результаты аэрофотосъемки. Это интересно с точки зрения работы мозга – планирование далекоидущих, хорошо организованных экспедиций. Надо послать вперед людей, потом на основании данных разведки принять решение.

– Так можно расселяться и без плана. Первобытному собирателю для пропитания требуется куда большая площадь, чем земледельцу. Поселились, размножились, отселились, и желательно далеко, чтобы свои же не съели.

– Для метода проб и ошибок требуется больше времени. Каким-то образом им удалось если не за 10, то за 30 тыс. лет пройти от Африки до Новой Гвинеи. Это очень малое время.

– Теперь мы переходим к заселению Америки. Еще недавно среди антропологов была такая каноническая гипотеза: *Clovis first*, непоколебимая, как птолемеевская картина мира: Америка была заселена через Берингов пролив около 13 тыс. лет назад т.н. кловисской культурой, которая вымерла всего через тысячу лет в Позднем Дриасе в результате резкого похолодания.

– В отношении Америки, как и в отношении Африки, очень много сделал Джозеф Гринберг. Американские лингвисты младших поколений настолько его не признавали, что, когда мы праздновали его 80-летие, это пришлось организовать в частном доме. И вот представьте, в частном доме другого лингвиста было собрание разных лингвистов из разных университетов Америки, которые приехали почтить Гринберга, но публичного празднования не было, и сборник в его честь вышел в Европе, а не в Америке. Гринберг уже старым человеком обратился к Америке и сравнил между собой все тогда известные американские индейские языки. Он показал, что большинство языков американских индейцев происходит от одного языка (это и до него предполагали, Сепир например), в которое, однако, не входят две группы языков. Это некоторые языки Аляски и Канады (языки на-дене), а также эскимосские и алеутские языки. И представьте себе, что сейчас данные генетики и археологии это подтверждают.

Еще очень интересны исследования Березкина (*Юрий Березкин, заведомо Америки Музея антропологии и этнографии (Кунсткамера) РАН, создатель электронного каталога фольклорно-мифологических мотивов мира и автор фундаментального труда «Мифы заселяют Америку: ареальное распределение мотивов в мифологиях Сибири и Нового Света»*. – Ю.Л.), их результаты есть на сайте Старостина.

Березкин с помощью огромной компьютерной базы данных изучал географию американских мифов. И вот оказывается, что данные Березкина, генетиков и археологов, которые давно уже сравнивают развитие каменных орудий в Сибири и Америке, – совпадают между собой. И получается, что было три разные хронологически эпохи расселения. Первая – 15 тыс. лет назад, то есть еще перед кловисской.

– Сейчас качнулись в другую крайность, я видела даты аж 40 тыс. лет.

– Это не подтверждается. Четыре науки – генетика, археология, лингвистика и исследование мифов, которым, в частности, занимается Березкин, – с этим не согласны. Пока мы можем считать, что заселение началось чуть раньше 15 тыс. лет.

– Я поясню для наших читателей, что 15 или 13 тыс. лет – это вопрос моста или вопроса пролива. Если в Америку переселяются в разгар ледникового периода, то это значит, что в этот момент Америку и Азию соединяет сухопутный мост в тысячу миль шириной.

Если переселение происходит, когда льды начали таять, то суши уже нет, а есть пролив. И вот у меня естественный вопрос: если они переселялись 15 тыс. лет назад, пусть они шли по суше в тысячу миль шириной, но они же шли через ледник! Это же как через Антарктиду! Как они могли понять, что можно пройти?

– Это вопрос психологии авантюристов. Мы не догадываемся об их средствах получения информации. Они могли наблюдать перелеты птиц.

– В связи с этим у меня возникает вопрос: может быть, они все-таки плыли? Вдоль суши, как в Австралию. Есть, я знаю, даже красивая гипотеза: в тех северных водах на мелководье замечательно растет ламинария. Вещь очень полезная и съедобная. И вот есть гипотеза, что они плыли, грубо говоря, путем ламинарии.

– Ничего не могу сказать. Были и более смелые гипотезы, например, Тура Хейердала, что заселение Америки шло через Южный океан. Она совершенно не подтверждается, хотя и выглядит красиво.

– Итак, первая волна – это 15 тыс. лет назад, и это языки всех народов Северной Америки, за исключением...

– Двух групп. Одна из них распространена в Канаде. Это так называемые языки на-дене. Эти языки родственны синокавказской группе языков, в частности кетскому языку.

– Которым вы когда-то занимались.

– Я с отрядом наших молодых ученых занимался двумя енисейскими языками, один из которых на моих глазах умер. Я записывал двух старух, дети и внуки которых уже перешли на русский язык. Это был язык югов...

Я расскажу один миф, который очень популярен у кетов. Молодой человек, ушедший из дома, взбирается на дерево, которое ведет к небу, и доходит до гнезда орла. Там он видит орлят. Прилетает орлица и просит его не обижать орлят. В обмен она дает ему орудия для изготовления огня. Я этот миф изучал у кетов. Этот же миф описан Леви-Строссом как миф, который совпадает у индейцев, живущих в самых труднодоступных местах Бразилии с одной стороны, и в Скалистых Горах – с другой. Более того – этот миф есть и у шумеров. Это один из древнейших мифов человечества. У Березкина много подобных примеров.

– У Березкина меня поразила одна мысль: что в американских мифах, которые он описывает, отсутствует понятие героя. Индоевропейский миф – это вот: герой пришел, увидел, победил. А миф американских индейцев отвечает на вопрос: «Откуда это?»

– Березкин описывает мотивы мифов не только американских индейцев. Он описывает те же мотивы и те же особенности у народов Океании и Австралии. Мы же в Европе наблюдаем очень поздние мифы.

– Возвращаясь к заселению Америки.

– Первая волна поселенцев шла через льды чуть раньше 15 тыс. лет. Много позже, вероятно, в районе 10 тыс. лет, область от Западной Сибири и до Канады была занята кетами, енисейцами и на-дене. Енисейцы должны были отделиться от синокавказцев не позже 10 тыс. лет, а по-

хоже, что именно енисейцев легко сравнивать с на-дене, а не всех синокавказцев. И третья, самая поздняя волна – это эскимосы и алеуты. Они, по-видимому, дальние родственники ностратической семьи. Некоторые их слова очень интересны. Например, «огонь» в их языках называется «кигни». Это то же, что индийское *agni*, латинское *ignis* и наш «огонь».

Эскимосские и алеутские языки интересны тем, что они на глазах истории разбрелись по всей северной оконечности Евразии, Северной Америки и Гренландии. Когда мы видим, как это происходит почти на наших глазах, мы понимаем, как это было в древности.

– В X веке, когда норвежцы заселяли Гренландию, в ней не было эскимосов. Они были до норвежцев и вернулись после, но когда Эрик Рыжий ее заселял, их не было.

– Да. Еще пример: по последним данным, чукчи вернулись на Чукотку из Северной Америки.

– Вы уже несколько раз говорили о любопытстве, которое толкало человека на поиски нового. В последнее время много говорят о гене *DRD4*. Среди многих его аллелей – это я объясняю для читателей – есть две аллели, *7R* и *2R*, которые связывают с «поиском новизны». И вот выясняется, что чем дальше на юг Америки, тем выше встречаемость данных аллелей, то есть: есть статистическая корреляция между «аллелью новизны» и тем, насколько далеко данная популяция расселилась...

– Хотя интересная гипотеза о связи одной аллели этого гена с миграциями появилась больше 10 лет назад, у меня нет полной ясности, насколько это обоснованно. Как будто здесь усматривается различие между оседлым и кочевым населением, что скорее важно для последующих эпох. С другой стороны, этот ген (важный для ряда проблем психиатрии и психопатологии) пробуют связать, например, с тяготением к финансовому риску или вообще к авантюрам и новизне, и за это могут отвечать и другие гены. Но вопрос остается. И работы генетиков в этом направлении продолжаются.

– Как вы относитесь к гипотезе моего любимого Джареда Даймонда? Он полагает, что вскоре после того, как человек проник в Америку и Австралию, он сожрал там всех крупных животных, которых мог бы приручить. Соответственно, не возникло цивилизации, состоящей в симбиозе с животными и использующей их мускульную силу, что и обусловило культурное отставание этих народов. И действительно, крупные животные в Австралии вроде бы исчезают 40 тыс. лет назад, а в Америке – около 12 тыс. Особенно поразительно то, что могло случиться в Австралии. Дело в том, что австралийские эвкалипты выделяют эфирные масла и очень хорошо горят. То есть они поджигали лес и без всякого труда имели жареную кенгурятину. И в результате не только извели мегафауну, но и устроили из Австралии пустыню.

– Я не до конца уверен. Теоретически это кажется вполне возможным, но насколько это согласуется с фактами, надо еще проверить.

– И кто хочет узнать, что было дальше с теми, кто свою мегафауну приручил (то ли потому, что не съел, то ли по другой причине), – читайте следующую главу.

Неолитическая революция была практическим результатом ошибочных моделей мироздания. Вроде Колумба, который открыл Америку потому, что имел ошибочные представления о диаметре Земли. В частности, это не был процесс одомашнивания жи-

вотных. Это процесс одомашнивания богов. У кого был тотем лиса, тому не повезло, у кого был тотем бык – тому повезло. Он запряг бога в ярмо и принялся пахать...

Итак, мы поговорили о расселении человечества: 40 тысяч лет – Австралия, 15 тысяч лет – Америка, и потихоньку дошли до события, которое случилось в Иорданской долине, или неподалеку, и перевернуло жизнь человечества. Я имею в виду не рождение Христа, а неолитическую революцию.

И поскольку я, как известно, человек далеко не левых взглядов, я должна на всякий случай сообщить читателям, что гениальный этот термин придумал марксист-археолог Гордон Чайлд. Правда, по Чайлду неолитическую революцию совершили арийцы. Он очень потом огорчался, когда национал-социалисты этой идеей попользовались. Я про арийцев помянула не случайно, а почему – станет ясно к концу беседы. Следите за арийцами.

– Итак – к неолитической революции.

– Давайте начнем раньше – с того времени, когда появляются первые признаки того, что Тейяр де Шарден называл ноосферой. Я имею в виду искусство или систему символов, которые мы находим во французских и испанских пещерах типа Ласко (Lascaux) 20–30 тыс. лет назад.

Что существенно? Там появляются рисунки, которые раньше называли искусством. Однако многие пытаются толковать их как символы. В частности, знаменитый французский археолог Леруа-Гуран предполагал, что могут быть условные знаки, например, символы мужского и женского, какие-то элементы тогдашней системы противоположностей. Очень популярно предположение, что это могут быть условные знаки созвездий.

– Минуточку. Меня как раз всегда поражала натуралистичность пещерных рисунков. Архаическое искусство вообще-то чаще рисует не «то, что видим», а «то, что важно». Возьмем, к примеру, американских индейцев, которые на каждой части фигуры животного рисуют глаз, потому что глаз – это важная часть тела. (Логично вообще-то.) Но вот палеолитические рисунки – они как раз поражают реализмом.

– Леруа-Гуран жил в эпоху сюрреализма и, конечно, не избежал искушения наложить на древнее искусство эстетику своего времени. Но, например, в Ласко есть точки, которые совсем трудно объяснить как изображения предметов. Очень многие ученые пытались считать эти точки – в частности, американский исследователь Маршак и сделавший то же самое независимо от него новосибирский ученый Фролов. Там, кроме чисел «пять» и «десять», связанных со счетом по пальцам, – появляется «семь», что похоже на лунную неделю. Отсюда идея, что эти росписи связаны со счетом времени по лунным неделям. Если это так, то одним из первых занятий этих людей должно было быть какое-то подобие астрологии.

Помните, мы по другому поводу уже цитировали Канта, у него же «есть только две тайны Вселенной, которые действительно волнуют меня, – это звездное небо над нами и нравственный закон внутри нас». Звездное небо их явно волновало. Что же до нравственного закона – в Ласко в одной из пещер есть явно изображение мертвого человека и рядом определенно птица. Похоже, что это символ души.

– А эти люди в пещерах-то жили? Может, они там только молились, а себе строили хижины из дерева?

– Похоже, что жили. Идея несовмещения ритуального пространства с жильем – она довольно поздняя. Что же до дерева, то они его использовали вполне определенным образом – они делали леса, по которым залезали наверх, чтобы расписывать стены пещеры. Ресурсов мало, кругом льды, они могли многое из дерева сделать, но они делали леса.

Еще более поразительная вещь – это краски. Довольно рано у человека (а возможно, и неандертальца) появляется символическая роль красной охры. У обитателей пещер была настоящая индустрия для получения красного цвета. Железистую руду, из которой можно извлечь хорошую охру, разогревали в кострах до высокой температуры, клали туда костную смесь – катализатор реакции. Это примерно то что нужно для получения железа. Почему они делали охру, а не железо?

Похоже, что почти все средства общества были направлены на создание символических росписей на стенах. И моя мысль заключается в том, что древним обществам свойственна более разумная оценка значения искусства, которая совершенно утрачена в последний период истории.

Есть общие соображения по поводу человеческого мозга, связанные с исследованиями эндорфинов – это группа химических соединений, похожих на морфий и синтезируемых самим мозгом. Они уменьшают боль и рожают чувство удовольствия. Мы не умеем их синтезировать, но мы можем заниматься такой деятельностью, которая стимулирует их появление. И в общем виде все средства стимуляции этих внутренних возможностей мозга связаны с искусством. С тем, что Юрий Кнорозов называл фасцинацией (*идея фасцинации – совершенно завораживающая идея. Это идея, грубо говоря, о существовании в коммуникации процессов, не сводимых к информации, но оптимизирующих ее передачу и способных существовать и без информации.* – Ю.Л.). Искусство – это все, что завораживает наш мозг. Если мы теряем эту способность к фасцинации, если у нас нет великих поэтов, которых признает все общество, то мы платим за это распространением наркотиков.

– Минуточку. Я всегда полагала, что, когда я бегаю, у меня в мозгу тоже вырабатываются эндорфины. У меня сильная, видимо, наркотического типа зависимость от серьезных физических нагрузок, и с учетом того, что такой же зависимостью страдают многие мои состоятельные знакомые, я бы даже сказала, что, возможно, в современных элитах спорт как средство получения кайфа начал замещать искусство.

– Эндорфины вырабатываются от хорошо организованной телесной деятельности, которую в правильно устроенных обществах, по-видимому, используют для искусства.

– Вернемся к высокой роли искусства. Мне, цинику, рассказ о людях, которые из дерева вместо дома делали леса, напомнил историю гибели норвежских поселенцев в Гренландии. Когда норвежцы поселились там в Xвеке, было сравнительно тепло, потом в XIVвеке началось похолодание. В Гренландии не было дерева для постройки кораблей – что было совершенно необходимо для выживания, и не было железа – ножи, найденные в покинутых домах, сточены до самой рукояти. И вот в этих условиях, при чудовищно ограниченных ресурсах, вместо дерева и железа норвежцы привозили с Большой земли в обмен на тюленьи шкуры украшения для церквей. И в итоге померли. Роль получается не высокая, а, скажем так, – двоякая.

– Я, собственно, перехожу к этому. Видимо, характер отношений с темными силами, дремлющими в природе, был очень мучителен для человека. В недавно открытой пещере Шове (пещера Шове была открыта в 1994-м археологом Jean-Mari Chauvet, это самая старая

пещера с рисунками, 30–32-тысячелетней давности), кроме костей людей, есть и кости медведей – не менее 190 пещерных медведей. Там же, на выступе камня, лежит медвежий череп, как на алтаре. Тогда же начинаются медвежьи могилы.

– Это что, медведей начали хоронить раньше, чем людей?

– Похоже, что так. Похоже, что доживший до наших дней на северо-востоке Азии медвежий культ – наследие очень древнее. Его следы также сохранились на севере Японии, у айнов. У айнов в семье воспитывался медведь. Когда он вырастал, его помещали в клетку.

Другой пример – это лиса. Ранние захоронения появляются где-то 15 тыс. лет до н.э., и чаще всего это захоронения человека вместе с лисицей. Но ведь лису никогда не одомашнивали. Однако во многих местах в мире существует культ лисы. В Китае это лисы-оборотни, которые стали популярными литературными персонажами. В Европе это Рейнеке-лис; у шумеров лиса – это самое интересное животное. Лиса во всех мифах очень умная и излюбленный персонаж ранних сатирических текстов. Один из древних шумерских текстов гласит: «Лиса помочилась в океан и сказала: «Смотрите, сколько я могу напрудить».

– Эти люди сами-то впроголодь жили – зачем еще кормить медведя?

– По-видимому, идея такая: есть воплощения высших сил в природе, которые мы не можем победить. Поэтому им нужно поклоняться. Надо иметь систему религии, в которой будут поклоняться разным страшным вещам. Тому, что антропологи потом назовут австралийским словом «тотем».

– Иными словами, неолитическая революция произошла от когнитивной ошибки? Поклонялись всем, и некоторые при этом одомашнились?

– Очень похоже. И с растениями то же. Тотемами могли быть животные, могли быть растения. Я не согласен с реконструкцией древней семьи у Фрейда, но основная идея его книги «Тотем и табу» – о том, что в течение длительного периода времени люди увлекались культами священных существ и вещей и ограждали себя огромным количеством запретов, – правильная.

Российский психоневролог Давиденков сразу после войны, в 1946 году, издал книгу «Эволюционно-генетические проблемы в психоневрологии». Идея Давиденкова состояла в том, что поведение древнего человека похоже на поведение невротика по Фрейду. Невротик всего на свете боится, и чтобы с ним что-нибудь плохое не случилось, ограждает себя системой бессмысленных запретов. Эта система древних запретов часто так далеко заходит, что общество мало что может сделать. Самое главное, что предположил Давиденков, – это значение для ранних обществ пандемии страха.

Дельгадо (*Хосе Дельгадо уехал из франкистской Испании в Йельский университет и знаменит своими исследованиями в области контролирования поведения обезьян через вживленные в мозг электроды.* – Ю.Л.) делал опыты с макаками. Подопытной обезьяне со вживленными в мозг электродами посылался радиосигнал, который стимулировал состояние страха. Через несколько минут паника охватывала все стадо. Что говорил Давиденков, не зная об этих опытах? То, что в первобытных обществах пандемии страха очень распространены, и чтобы люди могли функционировать, нужно иметь систему заклинаний и табу. Когда посмотришь, какое огромное время отделяет выход человека из Африки от неолитической революции, получается, что такие системы запретов заняли большую часть истории человечества. И очень существенная задача: бороться со следами этого в каждом из нас.

– Как с этой точки зрения, например, выглядит ислам с его запретом обнажать волосы для женщин?

– А как выглядит современное американское общество с его political correctness? Я как профессор американского университета каждый год должен проходить двухчасовой тест по поводу правил сексуального поведения. Это проблема запретов, которые каждому из этих обществ кажутся очень разумными. На самом деле они происходят от того, что в каждом из нас лежит этот гигантский психический груз. Надо это понимать и работать над тем, чтобы запретить запреты.

– Поэтому Pussy Riot, сплясав на солее, ударили куда больнее, чем демонстрация на Болотной?

– Из этого надо выпутываться. И это гораздо труднее, чем экономические проблемы. Нам всем внушили, что главное – это цены на нефть. Главное – это отделаться от нашей тенденции всего пугаться, и это нисколько не зависит от того, чего пугаешься. От конкретного медведя. Свой медведь, которого пугаешься, есть у каждого из нас.

– А людей одомашнивали?

– Да, первобытные люди имели тенденцию одомашнивать не только животных, но и других людей. В американских индейских языках есть не только слова, но и целые грамматические категории, обозначающие зависимых существ, живущих в доме. Это могут быть домашние животные, сироты, вдовы и рабы.

Меня очень поразило, когда я узнал от знакомого ирокеза из племени онондага, что одно и то же слово обозначает раба и домашнее животное. Самые яркие примеры рабовладельческих обществ как раз у индейцев Америки, и рабов они своих считали практически домашними животными. Степень недемократичности у первобытных людей – фантастическая. Есть радужные представления о том, что в первобытном обществе все были равны – это не так.

– Итак, возвращаясь к тем временам, когда пещерные люди искусством заворачивали свой страх...

– Период перед неолитической революцией интересен вынесением некоторых вещей, связанных с ноосферой, вовне человека. Очень важны новые находки, касающиеся музыки. Похоже, что что-то вроде первобытных флейт из костей животных возникает уже в палеолите. Это уже орудия, которые не имеют конкретного хозяйственного значения.

– Орудия для извлечения бога из воздуха?

– К этой же категории относятся ранние формы текстиля – может быть, случайно, но их находят вместе с предметами для поклонения. Так или иначе, текстиль появляется раньше, чем другие важные изобретения, и даже изделия из глины, которые потом оказались важными для керамики, могли быть связаны с древними культами. Очень широко распространенная вещь – это всякая мелкая скульптура, вроде палеолитических Венер с раздутыми бедрами и грудями, или фаллосов.

– То есть они сначала лепили из глины фаллосы и только потом – посуду?

– Да.

– Итак, мы переходим к неолитической революции. Из того, что вы говорите, следует, что она была практически результатом ошибочных моделей мироздания. Вроде Колумба, который открыл Америку потому, что имел ошибочные представления о диаметре Земли. В частности, это не был процесс одомашнивания животных. Это процесс одомашнивания богов. У кого был тотем лиса, тому не повезло, у кого был тотем бык – тому повезло. Он запряг бога в ярмо и принялся пахать.

– Неолитическая революция – это тенденция к переустройству всей культуры на основе первых практических приложений ноосферы. Это изменения отношения к пространству – понимание того, что храмы можно строить, а не просто использовать уже имеющиеся пещеры.

Что еще появляется в это время на Ближнем Востоке? Появляются знаки, так называемые tokens, которые обозначают число предметов, полученных новыми способами. Число голов крупного рогатого скота и мер зерна. Как только возникает хозяйство, надо его посчитать.

Есть довольно много языков, где, кроме числительных, есть счетные слова. Это первобытные языки. Счетные слова – это «столько-то круглых предметов», или «столько-то треугольных предметов». В счетных словах обычно фигурируют цилиндры, шарики, более-менее все тела, которые описаны в стереометрии, вплоть до многогранников.

И вот что было открыто лет тридцать назад археологом Шмандт-Бессера (Denise Schmandt-Besserat). Она нашла эти символы в мусоре, в ненужных предметах, найденных археологами. Я ей помогал в таких розысках в наших хранилищах, а потом попробовал сам продолжить такие поиски по музеям Венгрии, входившей в тот же ареал. Найти эти мелкие предметы нелегко. Шмандт-Бессера искала маленькие глиняные скульптурки, изображения геометрических фигурок. Она поняла, что исторически некоторые из этих знаков потом могли отразиться в клинописи. Идея ее была, что число овец считалось, к примеру, с помощью пирамидок. А быков – с помощью шариков. И оказалось, что это действительно так.

Это происходило на очень большом пространстве – от Балкан до Ирана, от Малой Азии до Египта. Это область неолитической революции и область распространения tokens. Эти знаки были в распоряжении культуры с 10 до 4 тыс. лет до н.э., и около 4 тыс. лет до н.э. из них возникает письменность.

Очень красив последний момент в этом развитии.

Предположим, что пирамидка – это овца. Вы хотите из своего селения переслать 10 овец в другое и изготавливаете 10 tokens и посылаете их вместе с овцами. Предположим, что ваш гонец нечист на руку и одну овцу съел. Что помешает ему выбросить и пирамидку? Тогда сделали глиняные конверты, в которых эти пирамидки клали.

Это установлено совершенно точно, и более того, есть конверты, которые археологи вскрыли, а есть запечатанные, содержимое которых определяли с помощью компьютерной томографии. И действительно, там, в конвертах, – определенное количество скульптурок.

И вот кто-то подумал – а зачем посылать в конвертах сами скульптурки, если можно эту пирамидку отпечатать на конверте? Получается клинописный знак. И представьте, что нашли такие конверты, и со скульптурками, и без, только со знаками. Кто придумал, что не

нужны скульптурки – достаточно послать проекцию трехмерного изображения на плоскость, мы не знаем. Но думали 5 тыс. лет.

– То есть собственность – причина возникновения счета и письменности. До этого было нечего считать. Причем собственность появилась во время неолитической революции. Пространство становится собственностью, когда оно превращается в поле.

– Происходит трансформация всех представлений людей, и, что важно, с очень сильным креном в сторону материальных благ. Наше общество потребления возникает в это время.

– Неолитическая революция произошла очень быстро. Почему? Начало ее подозрительно близко стоит к короткому, но резкому похолоданию в конце Раннего Дриаса. Вы видите, я очень люблю всякие климатические примочки: резко похолодало, надо было или вымирать, или менять среду.

– В общем виде это, безусловно, правильно, что человек нуждается в плохих условиях для развития. Я всегда думаю, что без очень сильных испытаний человечество склонно к гедонизму.

– Тогда почему неолитической революции не произошло в это время в Америке? Например, про кловисскую культуру достоверно можно сказать, что она из-за Раннего Дриаса вымерла.

– Ну это вопрос о степени ухудшения условий. Но я не уверен, что ответ носит чисто материальный характер. Какая-то часть человечества более склонна к интересным новым опытам.

– И эта часть человечества жила в Иорданской долине?

– Осторожнее сказать, что там обнаружены самые ранние из найденных памятников. В Палестине и Израиле очень много раскопано. По соседству раскопано меньше.

– И кто эти ребята были по национальности?

– Грубый ответ заключается в следующем: для бореальных праязыков, то есть всех ностратических, палеоазиатских и синокавказских, – для всех них вероятное место происхождения – Ближний Восток. Время распада этих праязыков – древнее десяти тысяч лет, но более или менее в пределах неолитической революции.

– То есть это были не арии, как был склонен считать Гордон Чайлд, а их предки, и предки семитов, и чеченцев, и китайцев, и, в общем, всех, кто живет сейчас в Евразии?

– Гордон Чайлд был замечательный ученый, но в то время хронологические границы совсем еще не были проведены. Термин «арии» – самоназвание иранцев, тех, из языка которых потом образовался санскрит и разные современные языки севера Индии и Ирана. И Чайлд правильно заметил связь распространения индоиранцев с изобретением и использованием колесных повозок. А за больше чем шесть тысячелетий до этого не было не только ариев, но и индоевропейцев: они еще не успели отделиться от других диалектов ностратического языка.

– У них возникло производящее хозяйство, и они так расплодились, что расселились?

– Да, это был сильный демографический взрыв – примерно как европейский капитализм.

– Тогда получается, что те, кто жил в Ласко 25 тыс. лет назад, имеют к нынешним европейцам не больше отношения, чем североамериканские индейцы – к нынешним обитателям Нью-Йорка?

– Думаю, что вы правы. Есть некоторые субстратные слова, которые в Европе сохранились, но их сохранилось мало.

– Одну секундочку. А генетически?! Вот эти новые пришельцы с Ближнего Востока; когда они пришли, допустим, во Францию, они стали правящей группой, одомашнили местное население, превратив его в рабов и лишив его собственного языка, или они просто физически вытеснили его?

– По-видимому, произошел плавный переход населения на другой язык – например, на синокавказский баскский в Испании и части Франции, потом на вульгарную латынь с баскского и т.д. – языки менялись несколько раз.

– А Китай? Там же человек тоже жил давно. И что – около 10 тыс. лет до н.э. приходят китайские арии, подчиняют местных и научаются к 8 тыс. лет до н.э. возделывать рис?

– В Китае тоже сменилось несколько разных языков и групп населения, на них говоривших. Но язык надписей на гадательных костях 2-го тысячелетия до н.э. уже можно считать предком того древнекитайского языка, к которому восходит литературный язык байхуа и многие диалекты. Часть других языков Южного Китая, входивших в австро-тайскую и австро-азиатскую семьи, сохранилась, но многие были вытеснены языками тех, кто распространялся с севера.

– И вот, собственно, на этом мы и прервемся. На том, что были очень высокодуховные люди, которые все ресурсы своего общества использовали для раскрашивания стен пещер. А потом на Ближнем Востоке появились грубые потребители, которые приспособили бога под упряжь. И теперь потомки этих грубых материалистов живут везде, а высокодуховных постигла судьба индейцев Америки.

– Давайте прервемся на другом. На том, что иногда что-то такое происходит с каким-то сегментом человечества, что он вдруг требует немедленного выхода на новые территории. Что послужило поводом для выброса из Африки? Ведь толчок явно был, и таких толчков в истории было очень мало. Выход из Африки. Выход из древнего Ближнего Востока. Третий – колонизация. Мне кажется – или я надеюсь, – что на наших глазах сейчас происходит такой же четвертый выброс – попытка дотянуться до других планет.

Автор: Юлия Латынина

По материалам сайта <http://www.novayagazeta.ru/society/>

М.Т. Левшенко

**ТУРИНСКАЯ ПЛАЩАНИЦА – РЕШЕНИЕ НАЙДЕНО:
«СОЛНЕЧНЫЙ» МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ «ИЗОБРАЖЕНИЯ»**

lev-mika@yandex.ru

ГНУ ВНИИКОП Россельхозакадемии

142703, Московская обл., г. Видное, ул. Школьная, 78.

Рассмотрены обсуждаемые в научной литературе возможные механизмы возникновения «изображения» на льняном полотне Туринской плащаницы. Показано, как могло образоваться это «изображение» на полотне естественным путем. Масляные следы отпечатка тела на белом полотне, содержащие частицы растительной смолы мирры, гидрофильные вещества из сока Алоэ, которые могли попасть на ткань вместе с маслом из мази, нанесенной на тело при погребении, под воздействием энергии южного солнечного света вызвали окисление и дегидратацию целлюлозы волокон ткани плащаницы. Это дало видимый эффект появления «изображения» на ткани.

Приводятся экспериментальные данные прогрева льняной ткани, на который был предварительно нанесен отпечаток ладони, смазанный мазью. Результаты прогрева такой ткани энергией света ксеноновой лампы, аналогом солнечного света, показали, что получается «изображение» ладони, состоящее из расплывчатых желтоватых пятен, без видимых границ. Это изображение ладони вызвано небольшим потемнением поверхности волокон ткани.

Ключевые слова: Туринская плащаница, исследования, масляный отпечаток на ткани, энергия солнечного света, катализаторы дегидратации целлюлозы, смола мирра, сок алоэ, экспозиция.

M.T. Levshenko

**THE SHROUD OF TURIN – THE DECISION IS FOUND:
«THE SOLAR RAYS» MECHANISM OF FORMATION OF «THE IMAGE»**

lev-mika@yandex.ru

VNIIKOP of the ROSSELHOSAKADEMIYA

Ul. Shkolnaja, 78, Vidnoe, Moscow oblast, 142703, Russia.

Possible mechanisms of occurrence of «image» discussed in the scientific literature on a linen cloth of the Shroud of Turin are considered. It is shown, how this «image» on a cloth could be formed by a natural way. Oil traces of a print of a body on the white cloth, containing particles of vegetative pitch myrrh, hydrophilic substances from juice of the Aloes which could get on a fabric together with oil from the ointment put on a body at burial, under influence energy of a southern sunlight have caused oxidation and dehydration of the cellulose fiber of a fabric of a shroud. It has given visible effect of occurrence of «image» on a fabric.

Experimental data of warming up of a linen fabric on which the print of a palm greased with ointment has been preliminary put are resulted. Results of warming up of such fabric energy of light of the xenon lamp, analog of the solar rays, have shown that «the image» of a palm consisting of indistinct yellowish stains, without visible borders turns out. This image of a palm is caused by small dimness of a surface of fiber of a fabric.

Key words: the Shroud of Turin, researches, an oil print on a fabric, energy of a solar rays, catalysts dehydration of the cellulose fiber, myrrh pitch, aloes juice, an exposition.

ВВЕДЕНИЕ

В музеях и в церквях мира хранится множество полотен древности, которые несут различные изображения. Многие изображения поражают нас своей неповторимостью, однако обычно мы знаем, как были созданы эти изображения. Легендарная Туринская плащаница с ее загадочным «изображением» – пока исключение из этого правила.

Полотно Плащаницы сейчас хранится в Турине, Италия. Плащаница представляет собой хорошо сохранившийся кусок пожелтевшего льняного полотна, размером 4,36 м в длину и 1,09 м в ширину. Туринскую плащаницу тщательно оберегают: за последние десятилетия эту реликвию выставляли на всеобщее обозрение всего несколько раз. Последний раз плащаницу показывали недавно – в 2010 году, когда ее смогли увидеть миллионы людей.

Наибольший интерес у всех на этом полотне вызывают желтовато-коричневые следы двух фигур обнаженного мужского тела, расположенных симметрично друг к другу, голова к голове. На одной половине этого полотна – образ мужского тела со сложенными впереди руками, на другой половине – его изображение со спины. Самое удивительное – что это изображение негативное, то есть более темные детали реального тела выглядят на полотне плащаницы (как на фотографическом негативе) – более светлыми, и наоборот (рис. 1). Только изображение на Туринской плащанице не является подлинным полным негативом. Если бы это был только негатив, то, например, темные волосы должны были выглядеть на полотне светлыми. На ткани хорошо заметны и кровавые следы, которые свидетельствуют, что перед смертью этого человека пытали. Эти следы крови тоже не негативные, а настоящие, соответствующие группе АВ крови человека.

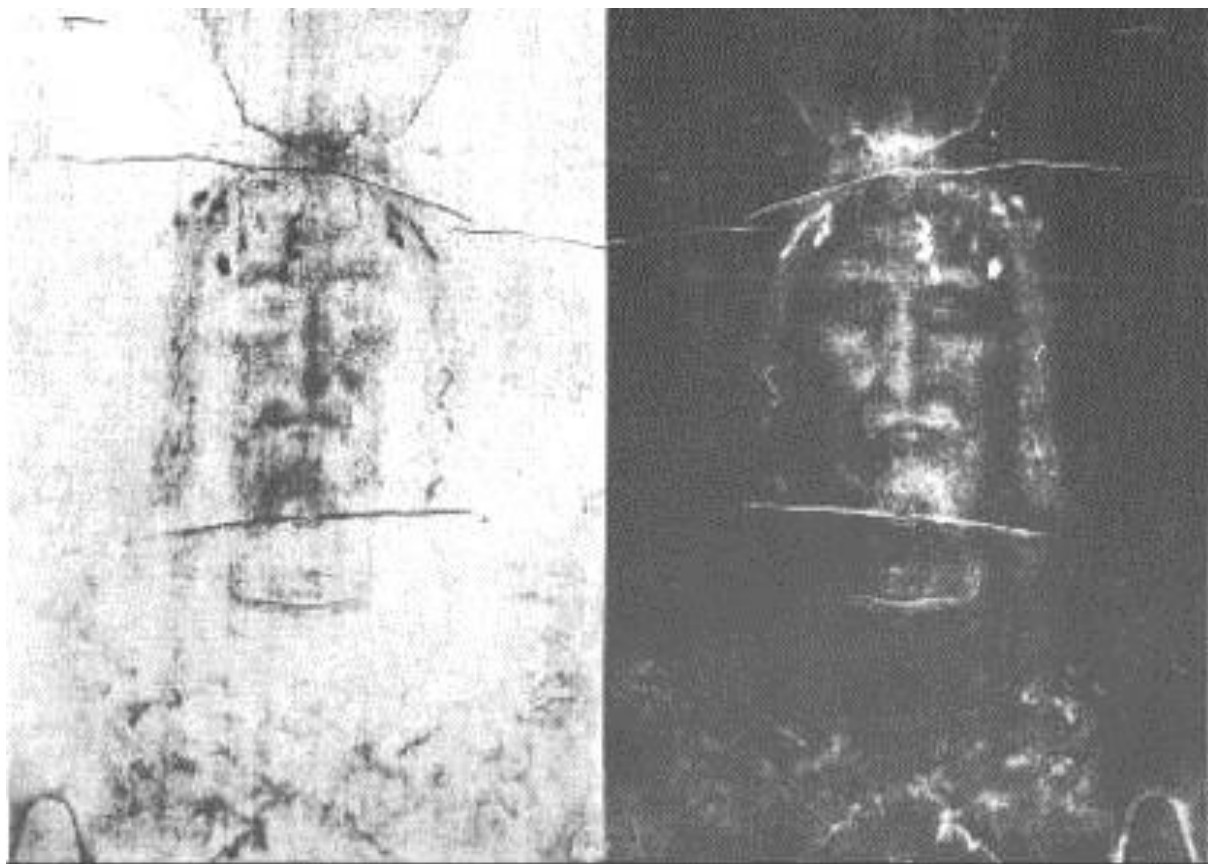


Рис. 1. Отпечаток лица на полотне Туринской плащаницы, как это мы видим (слева) и в фотографическом негативе (справа). Фото EnrieG., 1933

Ткань плащаницы по многим признакам отвечает характеристикам материи, сотканной предположительно в I столетии нашей эры. Хотя недавние, в 2009 году, находки израильского археолога Шимона Гибсона (Sh. Gibson) ткани погребального савана, датированной первым веком нашей эры, ставят такую датировку плащаницы под сомнение, так как способ переплетения нитей в найденной ткани кардинально отличается от полотна Туринской плащаницы [9].

Вот уже более века Туринская плащаница не дает покоя ученым. Об этой реликвии написано и издано множество книг и статей, в том числе и на русском языке. Была помещена и большая обзорная статья Валерия Сойфера (2003 г.) в журнале «Континент», посвященная состоянию исследований Туринской плащаницы. Но за прошедшее время со времени публикации этой статьи появились новые теории, которые и будут частично изложены в этой статье.

Раймонд Роджерс (R.N.Rogers) писал: «Изучение плащаницы - увлекательное исследование. Ее можно изучать и по строгим научным методам. Плохо только, что много диких фантазий некоторых авторов уничтожило доверие читателей к научным результатам, полученным исследователями плащаницы» [12].

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СВОЙСТВ «ИЗОБРАЖЕНИЯ» ТУРИНСКОЙ ПЛАЩАНИЦЫ

Научное изучение Туринского полотна началось еще в начале XX века, после того, как итальянский любитель-фотограф Секондо Пиа (Secondo Pia) опубликовал фотографический негатив изображения на полотне плащаницы. Однако только в 1969 году ученые были впервые допущены непосредственно к изучению полотна Туринской плащаницы.

В 1978–1981 гг., ученые из различных стран, в основном американские физики и химики, объединились в специальный проект «Исследовательский проект Туринской плащаницы» (STURP). В рамках этого проекта учеными были проведены физические и химические исследования непосредственно полотна плащаницы с использованием многих методов. Во время этой работы исследователями были проделаны тысячи различных анализов, на проведение и интерпретацию которых затрачены десятки тысяч часов работы ученых.

Микроскопические и спектроскопические анализы ткани в области изображения и вне его позволили определить, использовались ли какие-либо красители, сделанные на основе масел, наполнителей и растворителей; имеются ли различия в структуре волокон на разных участках плащаницы. Это давало возможность ученым выявить неоднородности в изображении и структуре ткани, обнаружить следы реставрации.

Результаты, полученные учеными Джулио Фанта (G. Fanti, E. Marinelli, 1999) и Джеком Джексонсом (J.P.Jackson, 1990) в рамках проекта STURP, показали, что никаких чужеродных веществ и красок в области изображения – ни минеральных, ни органических – на плащанице не обнаружены. Измерения, проведенные учеными с помощью разных приборов, дали один и тот же результат, показавший, что изображение сформировано измененными льняными волокнами. В волокнах пожелтела целлюлоза в результате дегидратации, т.е. потери молекул воды целлюлозой волокон. Получила объяснение и хорошая сохранность изображения на плащанице за многие сотни лет. Свойства целлюлозы полностью соответствует этому факту. Большинство ученых согласилось с таким объяснением образования изображения, как с основным.

Как показал профессор Кевин Моран (K.E. Moran, 1992), видимое изображение желтоватого отпечатка тела на полотне создано относительно небольшим количеством пожелтевших частей льняных волокон в нитях на поверхности ткани плащаницы. С нижней стороны нитей и там, где нити переплетены между собой, образуя основу ткани, волокна не имеют никаких потемнений. Исследователем плащаницы отмечено, что в сечении потемневших нитей наблюдалось всего от 2 до 5 мозаично потемневших волокон. При этом общее количество волокон в сечении этих нитей составляло от 80 до 120. Каждое потемнение волокна получается из разрывных пожелтевших частей волокна (пикселей) с четкими границами каждо-

го пожелтения – размером 15–20 мкм шириной (диаметр волокна) и 50–500 мкм длиной (рис. 2). Пожелтение пикселей очень равномерное, с четкими границами, и оно темнее на 30 % по сравнению с естественным белым цветом волокон.

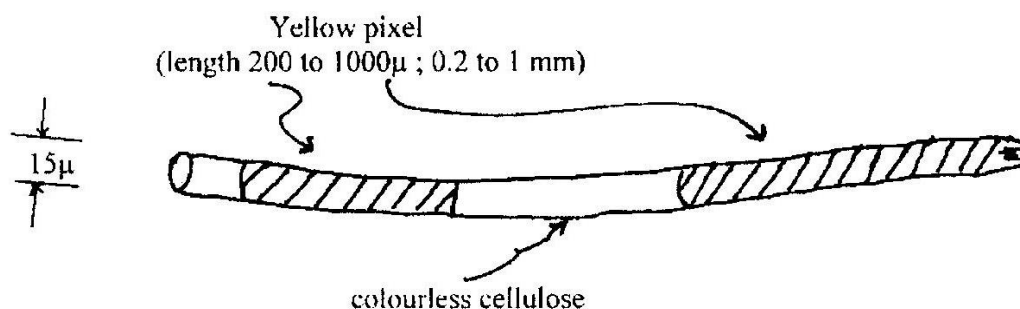


Рис. 2. Схема окраски «пикселя». Из статьи A.B. Power [29]

В местах ткани, где изображение темнее, пиксели (пожелтения) на волокнах ближе расположены друг к другу, в светлых областях они расположены дальше друг от друга. В местах большего потемнения изображения и частично пожелтевших волокон в этих местах в нитях больше. Важно, что интенсивность пожелтения пикселей не зависела от силы контактного давления частей тела на ткань. Это доказывает, что химический процесс, участвовавший в формировании изображения на ткани, был точно один.

Химическая природа образовавшегося желтого цвета пикселей была установлена Джон Хеллер и Алан Адлер (J.H. Heller, A.D. Adler, 1981). Они показали, что дегидратация и окисление молекул целлюлозы в волокнах ткани плащаницы может приводить к образованию молекулярных структур органических хромофоров желтого цвета, отсутствующих в обычных молекулах целлюлозы. Эти хромофоры имеют в своем составе ненасыщенные группы: карбоксильную или карбонильную $=C=O$, или содержат образовавшиеся двойные связи углерода $-CH=CH-$. Еще одно важное наблюдение этих ученых – кровь на нитях защитила их от излучения, которое вызвало потемнение льняных волокон нитей ткани. Под бурными следами гемоглобина крови, льняные волокна полотна сохранили естественный белый цвет.

Эти научные исследования Туринской плащаницы группой STURP смогли дать ответ на два основных вопроса: о природе изображения и о возрасте полотна. Ученые пришли к выводу, что изображение возникло из-за какого-то процесса, наиболее вероятная версия – кратковременное воздействие излучения (K.Moran, G.Fanta, 2002). Тем не менее, исследователи не смогли объяснить механизм, посредством которого двойное изображение тела человека было сформировано на этой ткани.

Полученные в результате этого исследования, обширные данные до сих пор служат основным материалом для научного изучения плащаницы. К сожалению, значительная часть результатов работ исследователей группы STURP опубликована в специальных научных журналах, малодоступных для неспециалистов. К настоящему времени, предложено более десяти теорий объясняющих процесс формирования изображения на полотне плащаницы естественным путем.

Дальнейшие исследования Раймонда Роджерса (R.N.Rogers, 2004) волокон плащаницы показали, что в этих разрывно пожелтевших волокнах ткани плащаницы окрашен только тонкий верхний слой этих волокон. Он показал, что в некоторых местах волокна плащаницы покрыты тонким слоем углеводов из крахмала, различных сахаров и других примесей, и этот слой претерпел химические изменения – окрасился в желтый цвет. Раймонд Роджерс и Анна Арнольди (R.N. Rogers, A. Arnoldi, 2003) выдвинули гипотезу, что раз окрашена только поверхность волокон нитей, значит окраска волокон образовалась в результате химических реакций с участием примесей, находившихся на поверхности этих волокон.

Роджерс Р. и Арнольди А. предположили, что эти примеси могли попасть и остаться на поверхности ткани, например, при сушке ткани после моющего раствора во время изготов-

ления ткани. В состав этих оставшихся примесей могли входить фракции крахмала и различных сахаров. Они доказывали, что изображение могло сформироваться с участием аминокорбонильной реакции Майара, при которой потемнение волокон целлюлозы происходит от образования темноокрашенных меланоидов, образующихся при нагревании моносахаридов с аминами. Газообразные амины, могли выделяться из мертвого тела человека через нос и рот, и потом могли взаимодействовать с примесями волокон ткани. Большой контраст изображения в области лица, волос головы, усов и бороды, по сравнению с отпечатком на плащанице остальных частей тела, они объяснили большим количеством прореагировавших аминов в районе головы. Эта реакция Майара происходит при более низкой температуре, чем реакция дегидратации целлюлозы волокон.

Основное возражение против этой теории Р. Роджерса и А. Арнольди то, что значительных количеств соединений азота и аминов в области потемневших волокон исследователями STURP обнаружено не было. Хотя, возможно, эта реакция и внесла какую-то часть потемневших волокон в создание «изображения» на плащанице.

Наблюдаемые разрывные (пиксельные) окрашивания волокон ткани попытался объяснить Бернар Повер (B.A. Power, 2003). Он считает, что в этом процессе участвовали микрокристаллы минеральных солей, которые присутствовали на поверхности волокон плащаницы, попав на полотно из мази с тела. Он предположил образование на волокнах плащаницы мелких капель воды, сконденсировавшихся на кристаллах солей. Конденсация влаги на кристаллах соли может иметь место при относительной влажности полотна больше 78 %. Капли воды на волокнах льняной ткани были распределены неравномерно, как и кристаллы растворимых солей, таких как хлорид натрия или хлорид кальция. Б. Повер предположил, что мощный импульс сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения вызвал перегрев этих капель воды выше 200 °С, что в свою очередь химически изменило целлюлозу волокон на коротких отрезках волокон ткани. В соответствии с размером капель, и образовались пожелтения волокон вдоль радиуса действия пара каждой испарившейся капли. Только как мог возникнуть такой импульс СВЧ, он так не смог предположить.

Несмотря на многочисленные доказательства отсутствия пигментов на полотне, интерпретация Плащаницы, как произведения неизвестного художника или мастера средневековья сохраняется с необычным упорством до настоящего времени. Например, Уолтер Мак-Кроун (W.C. McCrone, 1980) заявил, что по его мнению, неизвестный художник мог нанести изображение на полотно плащаницы с помощью природного пигмента гематита, содержащего железо.

В 1990 г. Эмили Крейг и Рандал Бресси (E.A. Craig и R.R. Bresee) предложили способ формирования изображения на полотне путем рисования сухим пигментом, например мелкой пылью углерода – порошка алоэ или смеси пылевидных окиси железа и коллагена. По этому способу, сухой пигмент может передаваться с чертежа на ткань непосредственным прикосновением. Закрепление полученного изображения производилось паром, который растворял коллаген, а при остывании коллаген закреплял тонким слоем пигменты изображения.

В 2009 году итальянские ученые во главе с Луиджи Гарласчелли (L. Garlaschelli) предложили способ создания изображения на ткани художником с помощью пигмента охры. По этому способу изображение фиксировалось на ткани, нагревом полотна в печи.

Но серьезных аргументов в поддержку своих теорий этими авторами предложено не было.

НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ЛЬНЯНЫХ ВОЛОКОН И ДЕГИДРАТАЦИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Отвлечемся пока от полотна Туринской плащаницы, и рассмотрим строение и свойства льняных волокон более подробно, используя данные из книги Г.И. Фридлянд (1982). Ткань полотна плащаницы соткана из нитей, состоящих из скрученных пучков льняных волокон. Основными компонентами льняных волокон, используемых в текстильной промышленности, являются следующие вещества: до 80 % целлюлозы (клетчатки), около 5 % лигнина, до 3 % гемицеллюлозы, 8–12 % воды и небольшие количества смол, жиров, воска, белка и других

веществ. Льянные волокна относятся к природным растительным лубяным волокнам, которые имеют сложное морфологическое строение. Структура и состав льянных волокон определяет и их свойства – относительно высокую прочность и значительную гигроскопичность, обусловленную гидрофильными свойствами молекул целлюлозы и гемицеллюлозы, а так же развитой капиллярно-пористой структурой льянных волокон.

Одиное льяное волокно (техническое волокно), используемое для прядения нитей, представляет собой группу из 10–25 элементарных волокон, соединенных вместе одревесневшими срединными пластинками лигнина. Размер элементарного волокна из средней части стебля льна составляет около 20–30 мм длинной и 16–32 мкм в диаметре. Клеточная стенка элементарного волокна состоит, в основном, из нескольких десятков тонких слоев целлюлозы. Целлюлоза относится к линейным полимерам, со степенью полимеризации в волокнах льна до 30000 мономеров – остатков глюкозы.

Большинство участков молекул целлюлозы в клеточной стенке расположены параллельно друг другу. Между параллельно расположенными участками молекул целлюлозы осуществляется межмолекулярное взаимодействие через водородную связь. Хотя энергия одной водородной связи сравнительно небольшая, но поскольку в молекуле целлюлозы много гидроксильных групп, то общая энергия связи взаимодействующих молекул достаточно велика, обеспечивая прочность льяному волокну. Участки стенок волокон, где части молекул целлюлозы, расположены в неупорядоченном состоянии, образуя поры и капилляры, могут прочно удерживать молекулы воды свободными гидроксильными группами молекул целлюлозы и гемицеллюлозы посредством водородной связи. В молекулах целлюлозы отсутствуют образующие цвет органические хромофоры, поэтому цвет волокон из целлюлозы – чисто белый.

Испарение воды из волокон ткани происходит, в основном, за счет подвода соответствующего количества тепла. Воздушно-сухая ткань имеет равновесную влажность с окружающим воздухом. Поэтому когда мы рассматриваем дегидратацию волокон воздушно-сухой ткани, то это дальнейшее удаление влаги из воздушно сухой ткани.

По мере удаления воды из волокон ткани, происходит сближение молекул целлюлозы в волокнах за счет сил водородных связей. Гидрофильные вещества, адсорбированные на поверхности волокон, являются «катализатором» дегидратации волокон. К таким веществам относятся крахмал и его модификации, растительные протеины и другие вещества. Эти вещества образуют водородные связи с молекулами целлюлозы и гемицеллюлозы волокон, вытесняя молекулы воды. Необратимое удаление молекул воды из волокна сопровождается образованием новых меж- и внутримолекулярных связей, при этом происходит и окисление целлюлозы, с возникновением образующих цвет хромофорных связей с не насыщенными группами.

Оценки, сделанные Б. Повер (В.А. Power, 2003) показали, что для дегидратации целлюлозы волокон, необходимой для формирования видимого изображения плащаницы, нужна энергия около 286 Дж на грамм целлюлозы подвергшихся дегидратации волокон. При подсчете этой энергии экспериментальную ткань нагревали до 200 °С, до видимого пожелтения целлюлозы волокон.

«СОЛНЕЧНАЯ» ГИПОТЕЗА ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ТУРИНСКОЙ ПЛАЩАНИЦЕ

Традиционная точка зрения, основанная на анатомических, физических, химических и биохимических результатах исследований полотна плащаницы, дает основание сделать вывод, что на полотне мы видим естественно образовавшийся отпечаток мертвого тела человека, предварительно подвергшегося пыткам. В 1984 г. физик Джон Джексон и др. (J.P. Jackson at other)) с помощью компьютерной программы создали объемную реконструкцию модели тела человека, преобразовав отпечаток тела на полотне плащаницы.

Процесс формирования изображения на ткани состоит из трех основных факторов: источник изображения – в нашем случае мертвое тело, содержащее на поверхности секреты тела и мазь, механизм передачи секретов тела и мази – контактный механизм передачи после

обертывания тела тканью, и приемник изображения – внутренняя сторона ткани. Самый спорный вопрос – в механизме закрепления изображения на полотне Туринской плащаницы.

Джованни Фацио (G. Fazio, 2006) утверждает на основании данных археологических раскопок, что в древнее время алоэ и мирра использовались при погребении в виде водяной или масляной суспензии и в сухом виде. В связи с термической нестабильностью, следы этих веществ не всегда можно обнаружить на погребальной ткани плащаницы. Как было отмечено на третьей международной Даллаской конференции следы алоэ и мирры были найдены на полотне Туринской плащаницы микроскопическим анализом B. Bollone (1983) и Nitowski (1986), но не были обнаружены Дж. Хеллер (J.H. Heller, 1983) и Р. Роджерс (R.N. Rogers, 2003) [12].

Изучение учеными льняных волокон полотна показало отсутствие жидкости в волокнах ткани в момент формирования изображения, т.е. тело было сухое (R.N. Rogers, 2002). Однако этот вывод не исключает попадание на ткань небольших количеств мази и влаги с тела.

Члены группы STURP С. Пелликори и М. Эванс (S.F. Pellicori, M.S. Evans, 1981) показали, что присутствовавшие на теле алоэ и мирра в контакте с полотном, могли выступить в качестве катализатора «скрытого изображения».

Для объяснения контактного механизма передачи изображения, Дж. Герман (J.D. German, 1977) предположил, что если ткань плащаницы первоначально была жесткой (например, после крахмаливания ткани), то после ее наложения на тело, она плотно должна контактировать с одними участками тела и слабо с другими участками тела. Соответственно, и отпечаток тела будет отражать на ткани различную контрастность этих частей тела.

Существуют две основные группы теорий закрепления изображения: первая группа – получение изображения от механизма диффузии при прямом контакте с трупом. Вторая группа теорий – термохимический эффект тепла или излучения для дегидратации целлюлозы волокон ткани. Первую научную попытку объяснить физические и химические процессы образования изображения на Туринской плащанице только химическим путем предпринял в начале прошлого века профессор Пауль Виньон (P. Vignon, 1937). По мнению П. Виньона изображение на ткани возникло из-за химического взаимодействия веществ на ткани, выделенных телом человека и использованных для бальзамирования. Этими веществами могли быть: оливковое масло, смола мирра, сок алоэ, окись железа из крови, мочевины, соли пота, вода и другие вещества. Только эта и подобные ей «чисто химические» теории не смогли объяснить пиксельную (разрывную) дегидратацию поверхностного слоя целлюлозы волокон ткани.

Закрепление изображения на ткани энергией излучения впервые, в пятидесятых годах прошлого века, предложила профессор Китти Литл (K. Little, 1978). Она проводила исследования по изучению воздействия ионизирующей радиации на льняные ткани. За счет различных доз облучения, образцы белой льняной ткани приобретали изменения оттенков от соломенно-желтого до темно-коричневого. Она предположила, что дегидратация льняных волокон с образованием соломенно-желтой окраски поверхности Туринской плащаницы могла возникнуть под воздействием кратковременного радиоактивного излучения на целлюлозу волокон полотна. Однако она так и не смогла ответить на вопрос, как могла подвергнуться такому радиоактивному облучению ткань плащаницы.

Пелликори С. (S.F. Pellicori, 1980) предположил, что если бы ткань плащаницы попала в условия повышенной температуры, то отпечатавшееся от тела изображение проступило бы на ткани. Он считал, что высокая температура ткани могла возникнуть аналогично температуре пожара 1532 года в Туринском соборе, когда обгорела хранившаяся в нем ткань плащаницы.

Пелликори С. решил смоделировать этот процесс. На кусок ткани были нанесены небольшие количества и тонким слоем потовые и сальные выделения человека, а также смола мирра и оливковое масло. Обработанную таким образом ткань подвергли нагреву на воздухе при температуре 125 °С в течение более 3 часов. Желтоватое потемнение ткани при таком прогреве, возникло только в тех местах ткани, где была нанесена смесь этих веществ.

Как только мы исключим предпосылку, что изображение было зафиксировано некоторыми химическими или энергетическими механизмами, происходившими, когда тело лежало в гробнице, а предположим, что фиксация изображения могла происходить и вне гробницы,

так сразу же приходит мысль об использовании энергии солнца. В весенний день на Ближнем Востоке вся атмосфера нагрета палящими лучами солнца. Объяснить механизм закрепления изображения на полотне энергией солнца пытались некоторые исследователи.

Наиболее подробно этот вопрос освещен в статье Сергея Муравьева (S.N. Mouraviev, 1997). С. Муравьев пишет, что Себастьяно Роданте (S. Rodante, 1983) показал, что на белой ткани, пропитанной водным или масляным раствором алоэ и мирры, под воздействием энергии солнечных лучей, через 5–15 минут на поверхности ткани появляется коричневый налет, и ткань не темнела на стороне, противоположной источнику света. Ткань, пропитанная этими составами и высушенная – не темнеет от солнечных лучей, даже после нагревания солнечными лучами в течение 60 мин. Этот факт С. Роданте использовал для подтверждения своей теории, что изображение на плащанице сформировалось в результате вспышки света, в момент воскресения тела. Кстати, эксперименты с попыткой получить при помощи вспышки света видимое потемнение ткани не увенчались успехом, так как во вспышке света недостаточно энергии для видимой дегидратации целлюлозы волокон.

Муравьев С. предложил собственную, достаточно сложную, теорию возникновения отпечатка. Он предположил, что тело и внутренняя сторона ткани плащаницы были пропитаны жидкой мазью из алоэ и мирры, растворенных в воде или масле. Отпечаток тела человека получился в результате отражения от помазанного тела на внутреннюю сторону ткани солнечных лучей, прошедших через ткань. Масляный раствор алоэ и мирры на ткани в этом случае действовал как катализатор. Что бы не было искажений пропорций тела на полотне, ткань должна была плотно прилегать к телу в момент облечения. Требовалась так же двойная экспозиция тела на солнечном свету, т.е. обернутое тканью тело во время освещения солнечными лучами нужно было перевернуть. Он считал, что хорошая прозрачность ткани плащаницы была видна на фотографиях в проходящем свете исследователя из группы STURP Б. Шворца (B. Schwartz). Экспериментальной проверки этой теории не проводилось, но можно предположить, что отраженной от тела солнечной энергии будет недостаточно для видимой дегидратации целлюлозы волокон ткани.

Недавно, американские ученые, профессора Натан Уилсон и Скотт Минич (N.D. Wilson, S. Minnich, 2005), предложили свою «солнечную» версию появления изображения на ткани. По этой версии, если освещать полотно белой ткани через стекло, с нарисованным изображением лица, то через несколько дней на полотне появляется негативное изображение, похожее на отпечаток на полотне Туринской плащаницы. Такая длительная экспозиция необходима для освещения белого полотна, от которого большинство солнечной энергии отражается при освещении ткани.

Предполагали использование энергии солнца в своей «фотографической» теории появления изображения на полотне и Линн Пикнет с Клайв Принс (2006) (L. Picnett, C. Prince), приписывающие авторство такого изображения Леонардо да Винчи. Только, согласно их теории, на ткань плащаницы попадал отраженный от освещаемого объекта свет. Естественно энергия этого отраженного света, взаимодействующего с полотном, была небольшой. Поэтому, что бы получить изображение на полотне, на него приходилось наносить дополнительно светочувствительные реактивы, и время выдержки на свету полотна, для получения видимого изображения, измерялось часами.

ОБЪЯСНЕНИЕ МЕХАНИЗМА ДЕГИДРАТАЦИИ ТКАНИ ТУРИНСКОЙ ПЛАЩАНИЦЫ

Рассмотрим процесс освещения солнечными лучами масляного отпечатка тела на полотне плащаницы. Тепло может передаваться волокну ткани теплопроводностью, конвекцией и электромагнитным излучением. Если тепло, необходимое для нагревания материала, передается в основном лучистой энергией, обычно такое нагревание называют радиационной сушкой или сушкой инфракрасными лучами.

Ткани относятся к материалам с малой проникаемостью лучистого потока видимых и инфракрасных лучей. Главной отличительной особенностью этого способа нагрева ткани является

то, что поток лучистой энергии, попадая на поверхность волокон, частично проникает в тонкий поверхностный слой волокон и поглощается, преобразуясь в тепловую энергию, а частично отражается от поверхности. Степень поглощения и отражения энергии зависит от характеристики лучевого потока и свойств поверхности волокон. В расчетах по радиационному теплообмену необходимо знать коэффициенты отражения и поглощения облучаемой ткани.

В настоящее время закономерности тепло – и влагопереноса в таких капиллярнопористых телах, как ткани, достаточно хорошо изучены и представляют собой аналитическую теорию взаимодействия тепло- и массопереноса в материале, описанную А.В. Лыковым (1968).

Сушка тканей из растительных волокон солнечным светом широко применяется в быту и в промышленности. Так же известно, что если взять кусок белого льняного полотна (или лист белой бумаги) и оставить его на освещаемом солнечными лучами месте, то под воздействием солнечного света он пожелтеет, то есть происходит естественная дегидратация и окисление целлюлозы волокон. Только время пребывания этого полотна, на солнечном свете, должно быть довольно длительным.

Общеизвестно, что в полуденные часы весенних и летних месяцев, особенно в южных районах Земли, энергия солнечных лучей у земной поверхности может достигать значительных величин. Подсчитаем, какую энергию могла получить ткань Туринской плащаницы, освещаемая солнечными лучами в районе города Иерусалима. На открытом воздухе освещение объекта определяется высотой солнца над горизонтом, что зависит от географической широты места, времени года, времени суток. На рассеяние и поглощение энергии солнечных лучей в атмосфере Земли большое влияние оказывает состояние атмосферы – влажность воздуха и его чистота от пыли.

Проследим, как перераспределяются потоки энергии, поступающие на солнечную сторону Земли, воспользовавшись данными из книги Б.Дж. Бринкворт (1976).

Энергетическая сила излучения Солнца (Солнечная постоянная), падающая на обращенную к Солнцу атмосферу Земли, примерно равна 1360 Вт/м^2 . Большая часть солнечной энергии в ультрафиолетовом спектре, основная часть энергии в инфракрасном спектре и часть энергии в видимом спектре поглощается или рассеивается многокилометровой толщиной атмосферы Земли. Солнечные лучи, несущие оставшиеся около 45 % энергии, преимущественно в видимой части спектра, могут достигать поверхности Земли. Дневное количество энергии солнечного излучения максимально не на экваторе, а вблизи широты в 40° . Подобный факт является следствием наклона Земной оси к плоскости ее орбиты.

Город Иерусалим расположен на широте 32° и на возвышенности, на высоте до 1 километра над уровнем моря в местности с сухим и чистым воздухом. Поэтому можно считать мощность $P = 800 \text{ Вт/м}^2$ (типичная интенсивность солнечного излучения в субтропиках в летнее время) – это вполне возможная энергия для облучения ткани плащаницы в районе Иерусалима в весеннее время. Если считать, что солнце освещало плащаницу с нужной стороны и под нужным углом, а облачный покров отсутствовал, и если предположить, что в полуденное время половина этой энергии отражалась от пропитанной маслом и частицами смолы поверхности ткани, остается энергия для поглощения волокнами около $300\text{--}400 \text{ Вт/м}^2$. На поверхности Туринской плащаницы «изображение» (точнее – частично потемневшие волокна) занимает площадь около 2 м^2 . В таком случае, за 0,5 часа освещения солнечными лучами полотна в полуденное время этот масляный отпечаток на полотне мог получить дозу солнечной энергии в количестве $300 \text{ Вт/м}^2 \times 1800 \text{ сек} \times 2 \text{ м}^2 = 1080000 \text{ Дж}$.

Сколько энергии нужно, что бы объяснить формирование изображения на плащанице? Химическую энергию, затраченную на дегидратацию целлюлозы волокон плащаницы легко вычислить по данным Б. Повера. Масса дегидратированных и окисленных волокон Туринской плащаницы лежит в пределах от 10 до 50 гр. Тепловая энергия затрачивается на дегидратацию 1 гр волокна – около 286 Дж. Следовательно, необходимая для получения «изображения» энергия лежит в интервале от 2860 до 14300 Дж. Как мы видим – солнечной энергии в районе Иерусалима достаточно для дегидратации целлюлозы, поэтому, ткань пропитанная маслом и частицами смолы, желтела в опытах С. Пелликори, под действием энергии солнечных лучей, за 10–15 мин.

Рассмотрим значение пропитки ткани маслом и определим равновесную температуру ткани. Тонкие пленки масел прозрачны для видимых, ультрафиолетовых и инфракрасных лучей. Смоченная маслом или водой, белая ткань поглощает видимые и инфракрасные лучи значительно лучше, чем сухая льняная ткань, за счет меньшего отражения. При поглощении телом солнечной радиации его температура повышается. Б. Бринкворт показывает, сколь многообразны пути, посредством которых тело приобретает и теряет энергию. Чтобы нам было легче понять поведение такого тела, упростим наблюдаемую картину. Предположим, что интересующее нас тело представляет собой тонкую пластину, лежащую на теплоизолирующем основании (рис. 3).

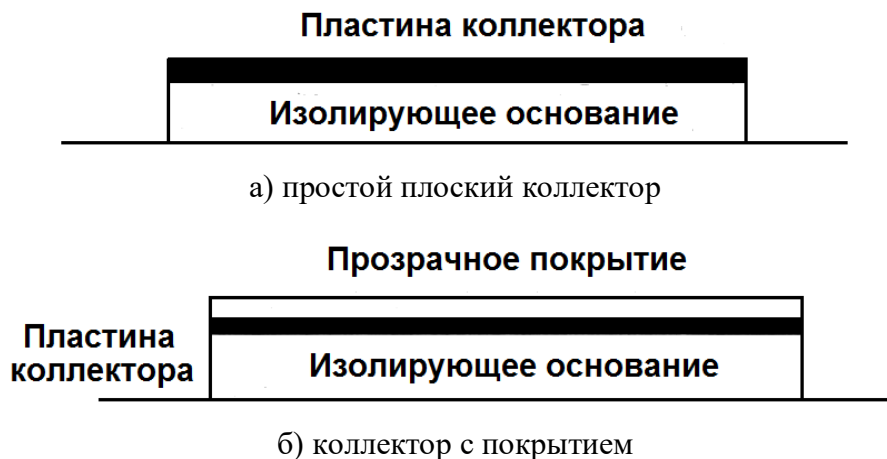


Рис 3. Плоские солнечные коллекторы. Из книги Б.Дж. Бринкворт[1]

Это элементы так называемого плоского солнечного коллектора. Под действием солнечного излучения эта пластина нагревается до тех пор, пока не достигнет равновесной температуры °С. Равновесную температуру мы получаем, по данным Б.Брикворта, полагая мощность солнечного света падающего на коллектор $P = 800 \text{ Вт/м}^2$, находим возможное значение равновесной температуры нагреваемой ткани равное около 70 °С.

Одним из наиболее эффективных методов усовершенствования солнечного коллектора является наложение на поверхность пластины поглотителя прозрачного для видимого света покрытия. Большинство тонких пленок полимеров и масел пропускают около 90% видимого солнечного излучения, но поглощают длинноволновое (инфракрасное) излучение, испускаемое поглотителем, т.е. получается так называемый «тепличный эффект». В результате этого эффекта потери тепла нагреваемой пластины на конвекцию снижаются. В нашем случае равновесная температура нагретого солнечными лучами полотна, покрытого прозрачной полимерной пленкой, будет по данным Б. Брикворта – уже более 110 °С. Поэтому, наверное, ткань, с высохшим маслом, в опытах у С. Пелликори, желтела намного медленнее, чем не высохшая, то есть пленка масла служила своеобразным коллектором тепла. Волокна ткани, покрытые сверху тонкой полимерной пленкой из масла мази представляют собой коллектор. Волокна нитей ткани под пленкой будут сильнее нагреваться – «микротепличный эффект». Я считаю, что пленка полисахаридов, обнаруженная Мак Креем на полотне плащаницы, тоже могла служить микроколлектором для нагрева волокон при солнечном облучении ткани.

Неравномерная (пиксельная) дегидратация волокон может быть объяснена неравномерным распределением в качестве катализатора дегидратации примесей на поверхности волокон. В качестве такого катализатора К. Моран и Дж. Фанти (2002) считают, что возможно это были вещества из сока алоэ. Пиксельную дегидратацию целлюлозы можно объяснить попаданием на ткань и других веществ, например растворов смолы мирры, в виде мелких капель. Капли с частицами ароматической смолы (мирры) попали на ткань вместе с маслом из мази, нанесенной на тело, и они обладают небольшой отражательной способностью. По-

глощая солнечную энергию и нагреваясь, они помогают процессу дегидратации воды с поверхности волокон с этими частицами смолы. Масляное окружение частиц смолы в этом случае, играло роль коллектора тепла к участкам волокон ткани, и способствовало процессу необратимой дегидратации влаги из нагретых частей волокон плащаницы. Другие части волокон нитей ткани, не содержащие на своей поверхности небольших частиц смолы, или солей, как считает Б.Повер, не перегревались и не подвергались дегидратации. Так могла образоваться мозаичная (пиксельная) дегидратация волокон полотна плащаницы. Нужно учитывать в этом случае излучения не только общую энергию облучения, но и мощность света, падающего на площадь частей отдельных волокон, пропитанных маслом.

Следовательно, в качестве «катализатора» удаления связанной влаги из нагретых волокон полотна могли выступать мукополисахариды из сока алоэ, соль пота, частицы смолы и некоторые другие гидрофильные вещества, находившиеся на волокнах полотна плащаницы. В этих условиях могло происходить и ускоренное окисление целлюлозы волокон плащаницы. В этом случае, необратимое удаление остаточной влаги из волокон и окисление целлюлозы происходило при нагревании полотна плащаницы при относительно низкой температуре, вероятно около 120 °С.

Необходимо экспериментально проверить, насколько реально это мое предположение.

ПРОВЕДЕНИЕ МОДЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Этот эксперимент описан в статье М.Т. Левшенко (2006). Для нанесения печатного рисунка на ткань, при окраске тканей, используется загущенный раствор красителя, так как вследствие достаточно высокой капиллярности натуральных волокон жидкий раствор красителя будет растекаться по ткани. При приготовлении печатной краски, для окрашивания тканей может применяться и естественный загуститель – крахмал (Г.И.Фридлянд, 1982).

Подготовка к проведению модельного эксперимента нами была разбита на этапы: приготовление «красящего» состава – мази, нанесение этого состава мази на ткань способом «прямой печати» – ладонью смазанной мазью, и завершение процесса «окраски» – фиксационная термообработка масляного отпечатка на ткани энергией света.

Основными компонентами мази, по нашим предположениям, были оливковое масло и мирра – ароматическая смола (торговое название ладан), выделяемая некоторыми растениями семейства Бурзеровых. Еще одним компонентом при приготовлении мази был сухой сгущенный сок «сабур», получаемый выжимкой из листьев Алоэ настоящее (*Aloe barbadensis*). Этот сок с древних времен широко использовали на Ближнем Востоке как разнообразное медицинское средство. Если считать ароматическую смолу мирру, как красящее вещество, а сухой сок алоэ содержал полисахариды в качестве загустителя, то масло оливковое из мази можно рассматривать, как пленкообразователь нашего «красителя». Кроме этих компонентов, в мази была и соль, которая попала в мазь из пота, высохшего на теле. Даже если при предварительном приготовлении мази в I веке н.э. сухие компоненты мази размешивали только в оливковом масле, вода должна была попасть в мазь и на полотно плащаницы из испарений тела после его обертывания полотном.

Для приготовления этого печатного «красящего» состава мази использовалась технология приготовления лекарственных мазей, рекомендуемая для фармацевтов. По этой технологии я готовил мазь концентрированную, суспензионную, гидрофильно-липофильную, эмульсионного типа «вода в масле».

Сок алоэ извлекали прессованием измельченных свежесобранных листьев Алоэ древовидное (*Aloe arborescens*), растения хорошо известного по комнатной культуре. Вместо высушивания сока алоэ, я использовал добавление в сок в качестве загустителя пшеничного крахмала, имеющего в растворах небольшую вязкость. Порошок крахмала тщательно перемешивали в фарфоровой чашке с равным количеством свежеежатого сока алоэ. В эту смесь добавляли поваренную соль из расчета до 1 %, опять перемешивали, и после этого добавляли при перемешивании равный объем водной эмульсии смолы мирры. Завершали приготовле-

ние нашей полученной смеси нагреванием при температуре 70–80 °С при перемешивании в течение около 5 минут, добавляя при этом равное по объему количество оливкового масла.

Я предполагаю, что фиксационная сушка масляного отпечатка на полотне Туринской плащаницы происходила в окрестностях Иерусалима под воздействием энергии солнечного света. Режим прогрева ткани энергией солнечного света я заменил прогревом ткани энергией света ксеноновой лампы. Л. Пикнет и К. Принс в своих опытах тоже экспериментальную ткань прогревали не солнечным светом, а светом ультрафиолетовой лампы. Я использовал ксеноновую лампу ДКсТ, с основным излучением в диапазоне длин волн 300–1200 нм, что дает спектр излучения света похожий на солнечный спектр.

При расчете необходимой мощности энергии модельного источника световой энергии учитывали, что на опытный образец ткани должно попадать от лампы энергия около 600 Вт/м², аналогично расчетному количеству солнечной энергии. Для этого, образец ткани я помещал примерно в 20 сантиметрах от лампы, мощностью 500 Вт.

Для проведения эксперимента был взят кусок белой полотняной льняной ткани, на который нанесли масляный отпечаток способом печати «ладонью», предварительно смазанной мазью. Ткань, с масляным отпечатком, прогревали светом ксеноновой лампы в течение 15–20 мин.

Результаты прогрева ткани показали, что получившиеся изображение ладони на ткани состоит из расплывчатых желтовато-коричневых пятен, без видимых границ (рис. 4). Очевидно, что этот отпечаток руки обладает некоторыми свойствами фотографического негатива. Части пальцев часть ладони, соприкасавшиеся с полотном, кажутся темными, и чем плотнее прижимались к полотну части ладони, тем темнее полученный отпечаток. Плотное прижатые части ладони обеспечили максимальное попадание смолистых веществ из мази на полотно. Части ладони, неплотно соприкасавшиеся с тканью, обеспечили попадание небольшого количества смолистых веществ с мазью, и, соответственно, это вызвало небольшое потемнение поверхности волокон ткани. Так как наш источник света, в отличие от Солнца, испускал не параллельные лучи, а рассеянный свет, то потемнение волокон целлюлозы в наших опытах произошло на большую глубину волокон нитей ткани, чем, вероятно, на волокнах ткани Туринской плащаницы.



Рис. 4. «Изображение» отпечатка ладони на прогревом льняном полотне

ИСТОРИЯ ВОЗМОЖНОГО ПОЯВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ТКАНИ

Но если «изображение» на ткани не дело рук художника, то кого же? Уильям Мичем (W. Meacham, 1983), в своей статье пишет, что возможно, какая-то средневековая религиозная секта, повторила на одном из своих членов казнь, которой подвергся Иисус. При этом был снят с тела отпечаток на ткань, и после ее прогрева, выдала ткань за погребальный покров? Существует и такая версия – «Подражание Христу». Кстати, мною получен отпечаток ладони на льняном полотне именно таким путем. Но мне нравится больше другая версия – «евангелистская». А если согласиться с «Новой хронологией» академика А.Т. Фоменко и Г.В.Носовского (2007), предположивших, что Иисус Христос жил на тысячу лет позже общепринятой даты, тогда и возраст ткани плащаницы, определенный учеными из группы STURP – XIII век н.э., будет соответствовать этой «евангельской» версии.

Что бы понять, как могло возникнуть изображение на Туринской плащанице, попробуем восстановить предполагаемую библейскую последовательность событий казни Христа, подробно описанную В.Сойфером (2003). По свидетельствам Евангелистов, Иисуса распяли на кресте приблизительно около полудня в пятницу по местному времени, накануне пасхи. Перед распятием его пытали. Снят он был с креста в девятом часу вечера этого же дня. Похороны были поспешными, так как согласно обычаям иудеев, тела нужно было непременно похоронить до захода солнца.

В новозаветное время, богатых жителей Иерусалима хоронили в вырубленных в известняковых холмах склепах-пещерах. Иисуса Христа похоронили в пещере, принадлежавшей богатому человеку Иосифу из Аримафеи, который был учеником и поклонником Иисуса. Об этой гробнице сказано, что она находилась на склоне холма Голгофы около Иерусалима. Добавим только, что эта пещера была, во время похорон, сухой.

Тело умершего Христа поместили в гробницу, завернув его обнаженное тело в льняной погребальный покров – плащаницу. Времени для омовения его тела не было, но перед обертыванием тела тканью, конечно, был совершен обряд помазывания тела небольшим количеством мази – умаснение благовониями. Поэтому на ткани сохранились отпечатавшиеся следы тела и крови. Отметим только, что погребенное тело, по-видимому, было сильно обезвожено в результате пыток и так как оно пробыло несколько часов распятым на кресте, освещенным солнечными лучами.

Затем, через два дня, к месту погребения Иисуса пришли женщины, чтобы продолжить обряд погребения. Они увидели, что на каменном ложе в склепе не было тела, осталось лежать только погребальное полотно.

К сожалению, Евангелисты в своих рассказах ничего не говорят о дальнейших событиях, происходивших у этой гробницы в тот день. Однако, с большой степенью вероятности, я могу предположить дальнейшее развитие этих событий. Конечно, в то утро пришел к гробнице и ее владелец, где он увидел оставшуюся ткань на погребальном ложе.

По воззрениям иудеев, все предметы, соприкасавшиеся с мертвым телом, считались ритуально «нечистыми», поэтому он сам, конечно, ничего внутри гробницы не трогал. Он позвал служанку и велел ей прибраться. Служанка начала уборку в гробнице, в тот день, около полудня. Она вытащила из гробницы полотно плащаницы и расстелила его на освещенном жарким апрельским солнцем склоне горы для просушки. На полотне должны были быть видны масляные и кровавые пятна, оставшиеся после обертывания тела тканью. Полотно плащаницы было обращено к солнечным лучам внутренней промасленной стороной. Потом, через некоторое время, служанка посмотрела на ткань, намереваясь убрать и ее, и удивилась – на ткани она увидела вместо бесформенных масляных пятен – бледный желтоватый расплывчатый отпечаток обнаженного тела. Можно предположить, что появление этого «изображения» удивило и И. Аримафейского, почему он и сохранил эту «нечистую» ткань.

Вячеслав Синельников (2002) пишет: «... Раннее утро. Гробница пуста. На высеченном ложе распростерлось траурное полотно, обожженное «молнией» Воскресения». Я же считаю, что полотно Туринской плащаницы обожжено не «молнией», а реальным солнечным светом, и не утром, а примерно в полдень. Масляные следы отпечатка тела на полотне, содержащие частицы смолы мирры и крахмала, соль пота, вещества из сока алоэ, под воздействием энергии южного солнечного света дали видимый эффект появления «изображения» на этой ткани.

ВЫВОДЫ

Туринская плащаница является одним из самых известных и спорных археологических артефактов. Для объяснения процесса формирования этого изображения на полотне были предложены различные теории. Некоторые из этих теорий основаны на проверяемых экспериментом процессах, другие являются спекулятивными.

По моим предположениям, на основе проведенных модельных опытов, можно сделать вывод, что обезвоженное на солнце тело и сухое место погребения, небольшое количество мази на теле, могли дать четкий масляный отпечаток тела на полотне.

На волокнах ткани плащаницы находилась пленка оливкового масла и полисахаридов, которая послужила коллектором тепла при нагреве полотна солнечными лучами. Солнечный свет в течение непродолжительного времени освещал полотно в определенном направлении, а состав мази был гетерогенный. На поверхности волокон полотна находились «катализаторы» дегидратации из мази – частицы сока алоэ, соль из пота, частицы смолы мирры. Неравномерное распределение этих примесей на поверхности волокон полотна плащаницы, послужили причиной неравномерного нагрева частей волокна ткани, что обусловило неравномерную (пиксельную) дегидратацию и окисление целлюлозы волокон. Значительный нагрев полотна плащаницы при этом отсутствовал.

Энергия солнечных лучей по всем параметрам соответствует требованиям ученых к источнику энергии, вызвавшему дегидратацию ткани Туринской плащаницы: параллельность лучей, кратковременность воздействия, неглубокое одностороннее проникновение, достаточное количество энергии. Конечно, следы крови на ткани плащаницы защитили льняные волокна от дегидратации под действием энергии солнечного света.

Проведенные предварительные эксперименты показали жизнеспособность предложенного «солнечного» механизма дегидратации льняных волокон ткани энергией солнечного света. Дальнейшие исследования позволят ответить на вопросы – какую роль в изображении внесли ароматические и гидрофильные вещества, какая была концентрация ароматической мази на теле, какой процент в изображении занимает потемнение сахаров под действием аминов, как долго полотно облучалось солнечными лучами.

Если эти эксперименты будут успешно проведены, то, как считает С. Муравьев, ничто не мешает ученым, когда-нибудь в апреле в Иерусалиме, выполнить конечный эксперимент в реальном масштабе времени и в натуральную величину.

Литература

1. Бринкворт Б.Дж. Солнечная энергия для человека. – М.: Мир, 1976.
2. Левшенко М.Т. Разгадка одной из тайн Туринской плащаницы // Химия и жизнь – XXI век. – 2006. – № 7.
3. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968.
4. Носовский Г.В., Фоменко А.Т. Царь славян. – М., 2007.
5. Синельников В. Туринская плащаница на заре новой эры. – М., 2002.
6. Сойфер В. Туринская плащаница и современная наука // Континент. – 2003. – № 117–118.
7. Пикнет Л., Принс К. Туринская плащаница / пер. Lynn Picknett and Clive Prince. – М., 2006.
8. Фридлянд Г.И. Отделка льняных тканей. – М., 1982.
9. An Israeli archaeologists discovered a 2,000-year-old gold earring.

[Http://www.thaindian.com/newsportal/world/an-israeli-arheologists](http://www.thaindian.com/newsportal/world/an-israeli-arheologists).

10. Baima Bollone P.L. La presenza della mirra, dell'aloe e del sangue sulla Sindone, in: La Sindone, Scienza e Fede, Atti del II Convegno Nazionale di Sindonologia, Bologna 1981, CLUEB. – Bologna, 1983.

11. Craig E. A., Bresee R.R. Image Formation and the Shroud of Turin // J. of Imaging Science and Technology. – 1994. – Vol. 34, № 1.

12. Fanti Giulio and other: Evidences for Testing Hypotheses about the Body image formation of the Turin Shroud. The third Dallas international conference on the Shroud of Turin. – Dallas, Texas, 2005. – September 8–11.

13. Fanti G., Marinelli E. Cento prove sulla Sindone: un giudizio probabilistico sull'autenticità, Ed. Messaggero, Padova. – 1999. [Http://www.shroud.com/fanti3en.pdf](http://www.shroud.com/fanti3en.pdf).

14. Fazio Giovanni The original presence of burial ointments on the Turin Shroud. Collegamento pro Sindone Internet. – 2006.

15. Heimburger Thibault: Comments About the Recent Experiment of Professor Luigi Garlaschelli. – 2009. [Http://www.shroud.com/papers.htm](http://www.shroud.com/papers.htm).

16. Heller H. John, Adler A.D. A chemical investigation of the Shroud of Turin // Canadian Society of Forensic Sciences Journal. – 1981. – Vol. 14, № 3.

17. Heller H. John: Report on the Shroud of Turin, Houghton Mifflin C. – Boston, 1983.

18. Jackson P. John: Is the image on the Shroud due to a process heretofore unknown to modern science? // Shroud Spectrum International. – 1990. – № 34.

19. Jackson J.P., Jumper E.J., Ercoline W.R. Correlation of image intensity on the Turin Shroud with the 3-D structure of a human body share // Appl. Opt. – 1984. – Vol. 23, № 14.

20. Little Kitti: Photographic Studies of Polymeric Materials // Photographic Techniques in Scientific Research. – 1978. – Vol. 3, № 4.

21. Meacham William: The Authentication of the Turin Shroud: An Issue in Archaeological Epistemology // Current Anthropology. – 1983. – Vol. 24, № 3. [Www.shroud.com/meacham2.htm](http://www.shroud.com/meacham2.htm).

22. McCrone W.C., Skirius C. Light Mikroskopical Study of the Turin Shroud, I // Mikroscope. – 1980. – № 28.

23. Moran Kevin, Fanti Giulio: Does the Shroud body image show any physical evidence of Resurrection? // IV Symposium Scientifique International du CIELT. – Paris, 2002. – 25–26 Avril.

24. Moran K.E. Optically Terminated Image Pixels Observed on Frei 1978 Samples. – 1992. – [Www.shroud.com/pdfs/moran.pdf&prev](http://www.shroud.com/pdfs/moran.pdf&prev).

25. Mouraviev S.N. The Image Formation Mechanism on the Shroud of Turin: A Solar Reflex Radiation Model (the Optical Aspect) // Applied Optics. – 1997. – Vol. 36, № 34. [Www.osa.org/pubs/osajournals.org](http://www.osa.org/pubs/osajournals.org).

26. Nitowski E. The Field and Laboratory Report of the Environmental Study of the Shroud in Jerusalem. – Carmelit Monasteri: USA, 1986.

27. Pellicori S.F., Evans M.S. The Shroud of Turin through the microscope // Archaeology, – 1981. – № 34.

28. Pellicori S.F. Spectral properties of the Shroud of Turin // Applied Optics. – 1980. – Vol. 19, № 12.

29. Power A. Bernard: How microwave radiation could have formed the observed image on the Holy Shroud of Turin // Collegamento pro Sindone Internet. – 2003.

30. Rench Aaron: Surprising new study on Shroud of Turin. Simple technique could have been used to produce image. – 2005. [Http://www.wnd.com/?paged=29124](http://www.wnd.com/?paged=29124).

31. Rodante S. The imprints of the Shroud do not derive only from radiation of various wavelength // Shroud Spectrum International 7 (Indiana Center for Shroud Studies, Nashville, Ind.). – 1983.

32. Rogers R.N. and Arnoldi A. The Shroud of Turin: an Amino-carbonil Reaction (Maillard Reaction) May explain the Image Formation // Melanoidins. – 2003. – Vol. 4.

33. Rogers N. Raymond: Frequently Asked Questions (FAQs. – 2004. [Www.shroud.com/pdfs/rogers5fags](http://www.shroud.com/pdfs/rogers5fags).

34. Rogers R.: Scientific Method Applied to the Shroud of Turin, a Review. – 2002.

[Http://www.shroud.com/pdfs/rogers2.pdf](http://www.shroud.com/pdfs/rogers2.pdf)

35. Vignon P., Wueshel E.A. Scient // Amer. – 1937. – Vol. 156.

PACS numbers: 07.85.Jy, 61.05.cc, 61.05.cf, 61.05.cp, 61.46.Hk, 61.72.Dd, 81.07.Bc

**В.Б. Молодкин¹, М.В. Ковальчук^{2,4}, В.Ф. Мачулин³, Э.Х. Мухамеджанов⁴,
А.И. Низкова¹, С.В. Лизунова¹, С.И. Олиховский¹, Е.Г. Лень¹,
Б.В. Шелудченко¹, С. В. Дмитриев¹, Е.С. Скакунова¹, В.В. Молодкин¹,
В.В. Лизунов¹, А.А. Катасонов¹, И.Н. Заболотный¹, В.П. Кладько³,
Б.С. Карамурзов⁵, Т.И.Оранова⁵, Ю.П.Хапачев⁵**

**ДИАГНОСТИКА СТРУКТУРЫ НОВЕЙШИХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
МАТЕРИАЛОВ И МНОГОСЛОЙНЫХ ИЗДЕЛИЙ НАНОТЕХНОЛОГИЙ
С НЕОДНОРОДНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ МАКРОДЕФОРМАЦИЯМИ
И МИКРОДЕФЕКТАМИ НЕСКОЛЬКИХ ТИПОВ**

molodkn@imp.kiev.ua

¹Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, бульв. Акад. Вернадского, 3603680, ГСП, Киев-142, Украина

²Учреждение Российской академии наук Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, Москва, Ленинский проспект, 59, Россия

³Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, просп. Науки, 41, Киев, 03028, Украина

⁴Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт», пл. Курчатова, 1, Москва, Россия

⁵Кабардино-Балкарский Госуниверситет.Россия.Нальчик.Чернышевского 173.

**V.B. Molodkin, M.V. Kovalchuk, V.F. Machulin, E.Kh. Mykhamedjanov,
A.I. Nizkova, S.V. Lizunova, S.I. Olikhovskii, E.G. Len,
B.V. Sheludchenko, S.V. Dmitriev, E.S. Skakunova, V.V. Molodkin,
V.V. Lizunov, A.A. Katasonov, I.N. Zabolotny, V.P. Kladko,
B.S. Karamurzov, T.I. Oranova, Yu.P. Khapachev**

**DIAGNOSTICS OF THE STRUCTURE OF CRYSTALLINE MATERIALS
NEWEST AND NANOTECHNOLOGY MULTILAYER PRODUCTS WITH
INHOMOGENEOUS DISTRIBUTION OF MACRODEFORMATIONS AND
MICRODEFECTS OF SEVERAL TYPES**

Работа посвящается раскрытию физической природы и разработке принципов практического применения обнаруженного недавно авторами принципиально важного и обеспечивающего радикальное расширение функциональных возможностей структурной диагностики материалов наноиндустрии явления уникального повышения при многократном рассеянии структурной чувствительности (на несколько порядков величины) и появления информативной возможности решения задач многопараметрической диагностики за счет обнаруженных зависимостей характера влияния характеристик дефектов на картины рассеяния от условий дифракции при многократном брэгговском и диффузном рассеянии рентгеновских лучей, нейтронов, электронов и других заряженных частиц в монокристаллических системах с дефектами. Это явление используется для создания основ и практической реализации неразрушающей количественной диффузодинамической комбинированной дифрактометрии впервые многопараметрических монокристаллических материалов и многослойных систем с дефектами нескольких типов.

Излагаются результаты создания необходимых в случаях многопараметрических систем с усложненной структурой как теоретических моделей, так и новых подходов и принципов и их практической реализации для осуществления многопараметрической диагностики, т.е. однозначного решения обратной задачи восстановления по картинам многократного рассеяния, экспериментально полученным в различных целенаправленно выбранных условиях динамической дифракции, характеристик нескольких типов дефектов и различных параметров сверхструктуры монокристаллических материалов и изделий нанотехнологий. В частности, созданы основы и практически осуществлена диагностика монокристаллов кремния с дефектами нескольких типов, многослойных систем с неоднородно распределенными от слоя к слою дефектами нескольких типов, многослойных сверхрешеток с самоорганизованными решетками квантовых точек, ионно-имплантированных гранатовых систем $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}/\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ со сложной ячейкой и неоднородно распределенными как от слоя к слою, так и внутри слоев макродеформациями разной природы и микродефектами нескольких типов.

Ключевые слова: микродефекты, многопараметрическая диагностика наносистем, многослойные системы, многократное диффузное рассеяние, макродеформации.

ВВЕДЕНИЕ

В отличие от классической кристаллографии [1–6], которая изучает параметры только идеально периодических кристаллических решеток, кристаллография на диффузном рассеянии [7] изучает отклонения от периодичности, обуславливающие это диффузное рассеяние, т.е. количественно устанавливает без разрушений характеристики дефектов и параметры искусственно созданных нанотехнологиями сверхструктур, которые и определяют основные физические свойства разрабатываемых материалов.

Как показано авторами в самое последнее время в работах [8–15], именно эффекты многократности диффузного рассеяния как рентгеновских лучей, так и нейтронов и других частиц, главным образом блоховский (стоячий) характер его волнового поля и экстинкция за счет рассеяния на дефектах, а также отличие на порядки величины этой экстинкции от известной брэгговской, обеспечили возможность повышения до трех порядков величины чувствительности картины к характеристикам дефектов и появление зависимости от условий дифракции этой чувствительности и самого характера влияния дефектов на картину динамического рассеяния и, следовательно, возможность экспериментальной реализации впервые многопараметрической и при этом существенно более высокочувствительной диагностики, т.е. однозначного решения обратной задачи восстановления по картинам многократного рассеяния в различных условиях дифракции характеристик сразу нескольких типов дефектов, как правило, одновременно присутствующих в кристаллах, и вместе с этим большого числа параметров сверхструктуры монокристаллических изделий нанотехнологий, что сегодня наиболее актуально.

Дальнейшее более эффективное использование указанной возможности многопараметрической диагностики обеспечивалось последовавшим бурным развитием исследований этой проблемы. Так, на основе квантово-механического рассмотрения [16], установлена и детально аналитически описана интерференционно-ориентационная, т.е. принципиально динамическая, природа этого недавно открытого [8] авторами важного для диагностики явления — зависимости от параметров, характеризующих различные условия дифракции, характера влияния дефектов на картину рассеяния при динамической дифракции излучения в кристаллических системах с дефектами. Установлена и количественно описана уникальная структурная чувствительность этих зависимостей и причины ее принципиального отсутствия при кинематическом рассеянии [17]. Показано, что это обнаруженное явление наблюдается экспериментально как уникально чувствительная к характеристикам дефектов многообразность [18] диффузодинамической картины, которая и обеспечивает уникальную возможность создания на этой основе управляемой многопараметрической кристаллографии (в том числе и наносистем). В результате создан уникально информативный структурный метод стоячих диффузных волн, а точнее, взаимодействующих между собой за счет процессов многократного рассеяния стоячих брэгговских и целого пакета стоячих диффузных волн [19, 20].

Настоящая статья предполагает обобщение результатов работ по созданию основ многопараметрической кристаллографии [1–85] и обсуждение результатов их практического применения для диагностики новейших кристаллических материалов с комбинированными технологически созданными нарушениями структуры и многослойных изделий нанотехнологий с неоднородно распределенными макродеформациями и микродефектами нескольких типов.

1. ДИФРАКТОМЕТРИЯ НА ЭФФЕКТАХ МНОГОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ДЕФЕКТАМИ НЕСКОЛЬКИХ ТИПОВ

1.1. Динамическая теоретическая модель трехосевой дифрактометрии кристаллических систем с дефектами

Интенсивность дифрагированного излучения, которое регистрируется трехосевым дифрактометром (ТОД), зависит от двух углов $\Delta\theta$ и $\Delta\theta'$, которые задают отклонение кристаллов соответственно монохроматора и анализатора от их точных отражающих (брэгговских) положений по отношению к ориентации образца. В случае, когда исследуемый кристалл содержит хаотически распределенные дефекты, эта интенсивность может быть представлена в виде суммы когерентной (I_{coh}) и диффузной (I_{diff}) компонент [48]:

$$I(\Delta\theta, \Delta\theta') = I_{\text{coh}}(\Delta\theta, \Delta\theta') + I_{\text{diff}}(\Delta\theta, \Delta\theta'). \quad (1)$$

При использовании бездисперсионной схемы ТОД (n , $-n'$, n) с геометрией дифракции по Брэггу на всех кристаллах кроме образца (на котором реализуется геометрия дифракции по Лауэ с индексами отражения n') когерентную и диффузную компоненты измеряемой интенсивности можно записать в виде [48–50]:

$$I_{\text{coh}}(\Delta\theta, \Delta\theta') = I_0 \int_{-\infty}^{\infty} dx R_M^{n_M} \left\{ b_M^{-1} \left[-b_S^{-1}(x - \Delta\theta) - \Delta\theta \right] \right\} R_{\text{coh}} \left[-b_S^{-1}(x - \Delta\theta) \right] R_A(x - \Delta\theta'), \quad (2)$$

$$I_{\text{diff}}(\Delta\theta, \Delta\theta') = I_0 \int_{-\infty}^{\infty} dx R_M^{n_M}(x) \int_{-\infty}^{\infty} dx' r_{\text{diff}}(\mathbf{k}) R_A(x' - \Delta\theta'), \quad (3)$$

а при использовании бездисперсионной схемы ТОД (n , $-n$, n) с геометрией дифракции по Брэггу на всех кристаллах рентгенооптической схемы выражение (2) для когерентной компоненты измеряемой интенсивности следует заменить на следующее:

$$I_{\text{coh}}(\Delta\theta, \Delta\theta') = I_0 \int_{-\infty}^{\infty} dx R_M^{n_M} \left\{ b_M^{-1} \left[b_S^{-1}(x - \Delta\theta) - \Delta\theta \right] \right\} R_{\text{coh}} \left[b_S^{-1}(x - \Delta\theta) \right] R_A(x - \Delta\theta'), \quad (4)$$

где I_0 – интенсивность излучения, которое падает на монохроматор, R_M и R_A – коэффициенты отражения соответственно монохроматора и анализатора, n_M – кратность отражения на монохроматоре, b_M и b_S – параметры асимметрии монохроматора и исследуемого кристалла, $\mathbf{k} = k_x \mathbf{e}_x + k_z \mathbf{e}_z$, $\mathbf{e}_x$ и $\mathbf{e}_z$ – орты в плоскости рассеяния. Функция r_{diff} в выражении (3) является проинтегрированной по вертикальной расходимости φ диффузной компонентой дифференциального коэффициента отражения исследуемого кристалла, а R_{coh} для образца в случае лауэ-геометрии в зависимости от того, проходящие или дифрагированные лучи регистрируются детектором ТОД, принимает значение или

$$R_{\text{coh}} = T \quad (5)$$

или

$$R_{\text{coh}} = R, \quad (6)$$

которые в соответствии с [51, 52] в обобщенных переменных приобретают вид:

$$T = \exp[-(\mu_0 + \mu_{DS})t] \frac{1}{4|y^2 + 1|^2} \left\{ \left| y + \sqrt{y^2 + 1} \right|^2 \exp(-Ktw_i) + \left| y - \sqrt{y^2 + 1} \right| \exp(Ktw_i) - \right. \\ \left. - 2 \operatorname{Re} \left[(y + \sqrt{y^2 + 1})(y - \sqrt{y^2 + 1})^* \exp(iKtw_r) \right] \right\} \quad (7)$$

$$R = \frac{\exp[-(\mu_0 + \mu_{DS})t]}{4|y^2 + 1|^2} |\zeta|^2 \left\{ \exp(Ktw_i) + \exp(-Ktw_i) - 2 \cos(Ktw_r) \right\}, \quad (8)$$

где $w_r = \operatorname{Re} w$, $w_i = \operatorname{Im} w$, $w = \lambda \Lambda^{-1} \sqrt{y^2 + 1}$, $\zeta = \left[(CE\chi_{\mathbf{H}} + \Delta\chi_{\mathbf{H}0})(CE\chi_{-\mathbf{H}} + \Delta\chi_{0\mathbf{H}})^{-1} \right]^{1/2}$, $\Delta\chi_{\mathbf{G}\mathbf{G}'}$ – зависящие от характеристик дефектов и от условий дифракции дисперсионные поправки к волновым векторам «сильных» брэгговских волн, обусловленные диффузным рассеянием (ДР) ($\mathbf{G}, \mathbf{G}' = 0, \mathbf{H}$), $\mu_0 = -K\chi_{i0}(1/\gamma_0 + 1/\gamma_{\mathbf{H}})/2$ – нормальный коэффициент фотоэлектрического поглощения, γ_0 и $\gamma_{\mathbf{H}}$ – направляющие косинусы соответственно падающей и дифрагированной волн, $\chi_{\mathbf{G}}$ и $\chi_{i\mathbf{G}}$ – усредненная по ансамблю дефектов Фурье-компонента комплексной поляризуемости кристалла $\chi(\mathbf{r}) = \chi_r(\mathbf{r}) + \chi_i(\mathbf{r})$ и Фурье-компонента ее мнимой части ($\mathbf{G} = 0, \mathbf{H}$), $E = \exp(-L_{\mathbf{H}})$ – фактор Кривоглаза–Дебая–Валлера, а $\mu_{ds} = -K\operatorname{Im}(\Delta\chi_{00}/\gamma_0 + \Delta\chi_{\mathbf{H}\mathbf{H}}/\gamma_{\mathbf{H}})/2$ – нормальный коэффициент эффективного поглощения, который обусловлен мнимой частью дисперсионных поправок вследствие ДР на дефектах к волновым векторам «сильных» брэгговских волн в случае дифракции по Лауэ.

Следует отметить, что при динамическом рассмотрении диффузная составляющая дифференциального коэффициента отражения, в отличие от таковой в кинематической теории, для определенного рефлекса уже не является неизменным при произвольных условиях дифракции прямым Фурье-изображением полей смещений от дефектов $\mathbf{u}_{\mathbf{q}}$, а сложным образом изменяется при изменении этих условий, например, толщины кристалла t . Так для лауэ-дифракции диффузную составляющую можно представить в следующем виде [51, 52]:

$$R_D(\mathbf{k}) = \frac{c(1-c)v_c t}{\gamma_0|y^2 + 1||y'^2 + 1|} \left(\frac{CEK^2}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{CE\chi_{\mathbf{H}} + \Delta\chi_{\mathbf{H}0}}{CE\chi_{-\mathbf{H}} + \Delta\chi_{0\mathbf{H}}} \right| \sum_{\delta\tau\lambda\sigma} (-1)^{\delta+\tau+\lambda+\sigma} X_{\delta\tau} \sqrt{\zeta_{\delta}'} (X_{\lambda\sigma} \sqrt{\zeta_{\lambda}'}^*) \Pi_{\delta\zeta\lambda\sigma} (\mathbf{H}\mathbf{u}_{\mathbf{q}\delta\tau}) (\mathbf{H}\mathbf{u}_{\mathbf{q}\lambda\sigma})^* \quad (9)$$

$$X_{\delta\tau} = \frac{\chi_{\mathbf{H}} c'^{(\tau)}}{c^{(\delta)} \zeta_{\delta}'} - \chi_{-\mathbf{H}}, \quad (10)$$

здесь c – концентрация дефектов, а множитель

$$\Pi_{\delta\tau\lambda\sigma} = \frac{\exp[-iKt(\Delta_{\delta} - \Delta_{\lambda}^*)] - \exp[-iKt(\Delta'_{\tau} - \Delta'_{\sigma}^*)]}{iKt(\Delta'_{\tau} - \Delta'_{\sigma}^* - \Delta_{\delta} + \Delta_{\lambda}^*)} \quad (11)$$

описывает интерференционное поглощение, в частности, эффект Бормана для диффузного рассеяния, Δ_{δ} и Δ'_{τ} – аккомодации волновых векторов когерентных и диффузно рассеянных волн, соответственно.

Аналогично, для случая Брэгг-дифракции коэффициенты прохождения (Т) и отражения (R) для когерентных волн можно представить в обобщенных переменных в виде [51, 52] (см. также [18]):

$$T = \frac{4|y^2 - 1| e^{-(\mu_0 + \mu_{DS})t}}{\left| y + \sqrt{y^2 - 1} \right| e^{Ktw_i} + \left| y - \sqrt{y^2 - 1} \right| e^{-Ktw_i} - 2 \operatorname{Re} \left\{ \left(y + \sqrt{y^2 - 1} \right)^* \left(y - \sqrt{y^2 - 1} \right) e^{iKtw_r} \right\}}, \quad (12)$$

$$R = \left| \zeta \right| \frac{e^{Ktw_i} + e^{-Ktw_i} - 2 \cos Ktw_r}{\left| y + \sqrt{y^2 - 1} \right| e^{Ktw_i} + \left| y - \sqrt{y^2 - 1} \right| e^{-Ktw_i} - 2 \operatorname{Re} \left\{ \left(y + \sqrt{y^2 - 1} \right)^* \left(y - \sqrt{y^2 - 1} \right) e^{iKtw_r} \right\}}, \quad (13)$$

где $\mu_0 = -K\chi_{i0}(1/\gamma_0 - 1/|\gamma_{\mathbf{H}}|)/2$, $\mu_{ds} = -K\operatorname{Im}(\Delta\chi_{00}/\gamma_0 - \Delta\chi_{\mathbf{H}\mathbf{H}}/|\gamma_{\mathbf{H}}|)/2$

Соответственно, диффузную составляющую коэффициента отражения в геометрии дифракции по Брэггу можно представить в виде [53, 54] (см. также [18]):

$$R_D(\mathbf{k}) = \frac{c(1-c)v_c t \left(\frac{CEK^2}{4\pi} \right)^2}{\gamma_0} \frac{1}{|U|^2 |U'|^2} \sum_{\delta\tau\lambda\sigma} (-1)^{\delta+\tau+\lambda+\sigma} X_{\delta\tau} X_{\lambda\sigma}^* \Pi_{\delta\tau\lambda\sigma}(\mathbf{H}\mathbf{u}_{\mathbf{q}_{\delta\tau}})(\mathbf{H}\mathbf{u}_{\mathbf{q}_{\lambda\sigma}})^* \quad (14)$$

$$X_{\delta\tau} = \frac{c^{(\tau)}}{c^{(\delta)}} \chi_{\mathbf{H}} - \zeta' \chi_{-\mathbf{H}}, \quad \Pi_{\delta\tau\lambda\sigma} = \frac{\exp \left[iKt(\Delta_{\delta} - \Delta_{\lambda}^* - \Delta_{\tau}' + \Delta_{\sigma}'^*) \right] - 1}{iKt(\Delta_{\delta} - \Delta_{\lambda}^* - \Delta_{\tau}' + \Delta_{\sigma}'^*)}, \quad (15)$$

$$|U|^2 = \left| y + \sqrt{y^2 - 1} \right| e^{Ktw_i} + \left| y - \sqrt{y^2 - 1} \right| e^{-Ktw_i} - 2 \operatorname{Re} \left\{ \left(y + \sqrt{y^2 - 1} \right)^* \left(y - \sqrt{y^2 - 1} \right) e^{iKtw_r} \right\},$$

$$|U'|^2 = \left| y' + \sqrt{y'^2 - 1} \right| e^{Ktw'_i} + \left| y' - \sqrt{y'^2 - 1} \right| e^{-Ktw'_i} - 2 \operatorname{Re} \left\{ \left(y' + \sqrt{y'^2 - 1} \right)^* \left(y' - \sqrt{y'^2 - 1} \right) e^{iKtw'_r} \right\},$$

где $w' = w'_r + iw'_i = \lambda\lambda'^{-1}\sqrt{y'^2 + 1}$, $\zeta' = (CE\chi_{\mathbf{H}} + \Delta\chi'_{\mathbf{H}\mathbf{0}})(CE\chi_{-\mathbf{H}} + \Delta\chi'_{\mathbf{0}\mathbf{H}})^{-1}$ – длина экстинкции для диффузно рассеянных волн, $\Delta\chi'_{\mathbf{G}\mathbf{G}'}$ – дисперсионные поправки к волновым векторам диффузно рассеянных волн, которые отвечают δ -му листу дисперсионной поверхности для когерентных волн ($\mathbf{G}, \mathbf{G}' = 0, \mathbf{H}$).

Как следует из анализа теоретических результатов этого раздела в целом, динамическая теория рассеяния излучений в монокристаллах с однородно распределенными дефектами различного типа предсказывает и описывает достаточно большое количество разнообразных эффектов многократности брэгговского и диффузного рассеяния и механизмов их проявления, которые принципиально отсутствуют при кинематическом рассеянии. К числу таких эффектов могут быть отнесены эффекты экстинкции и аномального прохождения как для брэгговской, так и для диффузной составляющих, обусловленные их интерференционным (стоячим) характером, и эффекты их структурной чувствительности, которые получили количественное описание, эффект экстинкции за счет диффузного рассеяния на отклонениях от периодичности кристаллов, эффект зависящего от условий дифракции аномального роста вклада диффузной составляющей, к примеру, с увеличением толщины кристалла, а также описанные в работах [10, 12] эффекты появления чувствительности к искажениям интегральной интенсивности и зависимости вклада диффузной составляющей от условий дифракции при переходе от кинематического к динамическому случаю и др. Все эти эффекты и механизмы их проявления устанавливались в разное время и использовались для диагностики на протяжении последних вот уже почти 50 лет. Однако только в самые последние 2–3 года стала проявляться главная их общая особенность, которая позволила радикально изменить облик современной кристаллографии. Приведенные в разделе 1.1 настоящей статьи теоретические результаты позволяют наглядно и убедительно продемонстрировать эту особенность. Как следует из формул (1)–(15) вскрытая общая особенность состоит в том, что все эти эффекты многократности брэгговского и диффузного рассеяния, в том числе и эффекты взаимного влияния процессов брэгговского и диффузного рассеяния всегда приводят при всем своем многообразии (хотя и к различного рода), но во всех случаях к единому важному результату – к радикальному усилению и появлению существенной взаимосвязи зависимостей картины динамического рассеяния от условий дифракции, с одной стороны, и от характеристик дефектов, с другой. При кинематической дифракции такие зависимости существен-

но более слабые и не влияют одна на другую. Кинематическое рассеяние обладает диагностическими способностями только благодаря единственной в кинематическом случае взаимосвязи зависимостей интенсивности дифрагированного излучения от характеристик дефектов, с одной стороны, и от положения точки наблюдения в пространстве обратной решетки, т.е. от вектора рассеяния, с другой. При динамической дифракции кроме этого появляется обусловленная указанными выше эффектами многократности дополнительная существенная взаимосвязь указанных двух зависимостей с зависимостями интенсивности дифрагированного излучения от достаточно большого числа других параметров, характеризующих условия дифракции. Как наглядно демонстрируют формулы динамической теории (1)–(15) указанные зависимости картины динамического рассеяния от условий дифракции и от характеристик дефектов оказываются существенно усиленными и более сложными, а также взаимосвязанными. При этом такие усиление и взаимосвязь указанных зависимостей достигаются за счет совместного воздействия сразу нескольких конкурирующих механизмов проявления многократности рассеяния, каждый из которых способен обеспечить необходимые и усиление, и взаимосвязь. Однако результат конкуренции сам зависит от условий дифракции и от характеристик дефектов. Это и обуславливает многообразность картины динамического рассеяния и радикальное улучшение чувствительности и информативности диффузодинамической диагностики, что и предполагается более подробно рассмотреть и использовать для диагностики многопараметрических систем ниже в этом и в следующих разделах статьи.

Следует отметить, что полученные выражения для брэгговской и диффузной составляющих картины рассеяния описывают результат взаимодействия волнового поля дифрагирующего излучения и кристалла между собой и по этой причине содержат сомножители, связанные как с характеристиками кристалла (атомные амплитуды рассеяния, коэффициенты поглощения, параметры дефектов), с одной стороны, так и с характеристиками волнового поля, зависящими исходно только от условий дифракции, с другой. В кинематической теории обусловленные этим зависимости картины рассеяния от условий дифракции и от характеристик дефектов в бесконечном кристалле факторизуются. При этом в бесконечном кристалле распределение интенсивности дифрагированного излучения в пространстве обратной решетки (в импульсном представлении) определяется только сомножителем в диффузной составляющей, который обусловлен флуктуационной частью восприимчивости кристалла, т.е. отклонениями от периодичности в кристаллической решетке, вызванными дефектами. Таким образом, для бесконечных кристаллов распределение кинематической картины рассеяния в обратном (импульсном) пространстве непосредственно определяется соответствующими распределениями компонент Фурье полей смещений атомов кристалла от дефектов, а именно распределениями интенсивности флуктуационных волн в пространстве обратной решетки (по волновым векторам). Сомножитель, определяемый условиями дифракции, не зависит от волнового вектора флуктуационной волны и не содержит зависимости от ориентации по отношению к кристаллу волнового вектора падающей на кристалл бегущей (плоской) волны, а плавно зависит только от длины волны и от вектора рассеяния на периодической составляющей кристалла, причем этот вектор является фиксированным для заданного рефлекса. В кристаллах конечных размеров появляется свертка указанного распределения по векторам диффузного рассеяния с компонентами Фурье функции формы кристалла, которая не зависит ни от характеристик дефектов, ни от условий дифракции и при размерах кристалла много превышающих длину экстинкции, приводит к несущественному размытию картины рассеяния, одинаковому для всех векторов диффузного рассеяния. В результате в кинематическом случае картина рассеяния не зависит отдельно от волновых векторов начального и конечного состояний дифракции, а только от их разности, т.е. определяется распределением по векторам диффузного рассеяния (волновым вектором флуктуационных волн). По указанной причине сомножитель, зависящий от условий дифракции, оказывается одинаковым для любой точки в пространстве обратной решетки. В результате в кинематическом случае зависимости картины рассеяния от характеристик дефектов и от условий дифракции разделяются и не взаимосвязываются между собой.

Ситуация радикальным образом меняется при переходе к случаю динамического (многократного) рассеяния. При этом учет все большей степени многократности приводит к увеличению многообразия возможных вариантов вкладов в картину дифракции различных каналов многократного рассеяния. Так, в кинематическом случае картина рассеяния определяется только матричными элементами от двух частей потенциала рассеяния – периодической и флуктуационной, взятыми между начальным и конечным состояниями, которые являются плоскими (бегущими) волнами. Как отмечено выше в обоих этих матричных элементах взаимосвязь зависимостей картины рассеяния от характеристик дефектов и от условий дифракции отсутствует. При динамической дифракции дополнительно к отмеченным для кинематического случая появляются вклады в интенсивность дифрагированного излучения за счет рассеяния брэгговских стоячих волновых полей, сформированных предварительным многократным рассеянием падающей плоской волны на периодической составляющей решетки кристалла, на отклонениях от периодичности, т.е. на флуктуационной составляющей кристаллического потенциала рассеяния (или восприимчивости кристалла). Такие матричные элементы для флуктуационной составляющей кроме отмеченной выше зависимости от волновых векторов флуктуационных волн полей смещений, определяемых характеристиками дефектов, приобретают резкую зависимость от условий дифракции за счет сомножителя, связанного со ставшим уже стоячим брэгговским волновым полем, и, следовательно, описывающего появившийся интерференционный характер его отражения и поглощения кристаллом. В результате возникает дополнительная ориентационная зависимость от волнового вектора проходящей брэгговской волны в сформированном стоячем волновом поле, т.е. от отклонения $\Delta\theta$ падающей на кристалл волны от точного выполнения условия Вульфа – Брэгга, которое варьирует начало как вектора диффузного рассеяния, так и волнового вектора флуктуационной волны, т.е. изменяет зависимость соответственно этого сомножителя от условий дифракции, так как влияет на структуру и локализацию этого волнового поля, и обуславливает его зависимость от характеристик дефектов. При этом указанный матричный элемент дополнительно контролируется варьированием конца волнового вектора диффузной волны, которое определяется характеристиками дефектов кристалла. В результате при динамической дифракции картина рассеяния характеризуется существенной взаимосвязью зависимостей от характеристик дефектов и от условий дифракции.

Динамическая теория дифракции, рассмотренная в этом разделе (1.1) статьи, описывает также возможность вкладов в дифракционную картину от кроме уже проанализированных каналов многократного рассеяния, также вклада от канала, в котором учитывается влияние возможной перестройки волнового поля бегущих диффузных волн в стоячие волновые поля за счет их последующего рассеяния на периодической составляющей рассеивающего кристалла. При этом в дополнение к рассмотренному выше это приведет к появлению явной ориентационной зависимости в пакете стоячих диффузных волн, его структуры и локализации относительно кристалла от отклонения ($\Delta\theta'$) направления волновых векторов выходящих из кристалла диффузных волновых полей (конца их волновых векторов) от точного выполнения условия Вульфа–Брэгга, которое задается характеристиками дефектов, однако связано с зависимостью самой диффузной составляющей волнового поля от условий дифракции. Это обеспечивает дополнительную взаимосвязь зависимости картины динамического рассеяния от характеристик дефектов и от условий дифракции.

Так, при фиксированных углах выхода ($\Delta\theta'$) изменение угла входа ($\Delta\theta$) влечет за собой изменение волнового вектора $\mathbf{k}$ флуктуационной волны. По этой причине взаимосвязанные изменения $\Delta\theta$, определяющие зависимость волнового поля рассеиваемой волны от условий дифракции, и $\mathbf{k}$, связанные с характеристиками дефектов, обуславливают взаимосвязанность влияния характеристик дефектов и условий дифракции на картину динамического рассеяния. Аналогично, если фиксировать углы входа ($\Delta\theta$), то изменение $\mathbf{k}$ влечет за собой изменение $\Delta\theta'$ и взаимосвязывает обусловленную этим зависимость от условий дифракции характера

стоячего диффузного волнового поля и, следовательно, картины рассеяния, со связанной с изменениями k зависимостью картины от характеристик дефектов.

Таким образом, установленная взаимосвязь зависимостей картины динамического рассеяния от условий дифракции и характеристик дефектов обусловлена в первую очередь стоячим (блеховским) характером волновых полей формирующих диффузное рассеяние, а также, как видно из формул (1)–(15), и другими эффектами многократности рассеяния, которые будут проанализированы ниже.

При этом обнаруженная по-существу зависимость от условий дифракции характера влияния дефектов на картину динамического рассеяния, проявляющаяся как многообразность картины при ее экспериментальном наблюдении в различных дифракционных условиях, обусловлена формированием кристаллом с дефектами в процессе многократного рассеяния самоорганизованных стоячих брэгговского и диффузных волновых полей с управляемыми условиями дифракции и уникально чувствительными зависимостями от характеристик дефектов. А именно, формирование такого зонда с атомноразмерной периодичностью и соответствующей разрешающей способностью обеспечивает сильную зависимость характера последующего многократного взаимодействия кристалла с этим волновым полем от их взаимной локализации, которые (и взаимодействие, и локализация) управляются как условиями дифракции, так и характеристиками дефектов. В результате динамическая картина рассеяния оказывается на порядки величины более сильно зависящей от условий дифракции и характеристик дефектов и к тому же принципиально взаимосвязанным образом в отличие от кинематического случая.

1.2. Основы диагностики монокристаллических материалов с дефектами нескольких типов за счет использования явления уникально чувствительной к характеристикам дефектов многообразности динамической картины рассеяния

В этом разделе работы рассмотрены разнообразные механизмы конкурентного воздействия разного рода эффектов многократности на результат взаимодействия указанного зонда с кристаллом и формирования чувствительной к типу и характеристикам дефектов многообразности за счет обеспечения тем или иным способом усиления и взаимосвязанности зависимостей картины динамического рассеяния от условий дифракции и характеристик дефектов, что и является причиной, обуславливающей открытое явление, наглядно проиллюстрированное ниже на рис. 1–9.

Рис. 1–9, полученные с использованием теоретических результатов раздела 1.1, наглядно демонстрируют обнаруженную уникальную чувствительность к дефектам многообразности полной динамической картины рассеяния в кристаллах с дефектами за счет изменения условий дифракции. При этом на рис. 1–5 демонстрируется многообразность за счет изменения толщины образца и геометрии дифракции при фиксированных длине волны и характеристиках дефектов, на рис. 6 и 7 – за счет изменения длины волны и геометрии дифракции при фиксированной толщине для дефектов разного типа, а на рис. 8 и 9 – за счет одновременного изменения длины волны и толщины в геометрии Лауэ для случаев тонкого (рис. 8, $\mu_0 t = 1$) и толстого (рис. 9, $\mu_0 t = 5$) кристаллов при варьировании величины отношения длины абсорбции к длине экстинкции за счет изменения длины волны.

На рис. 2 по сравнению с рис. 1, наблюдается определяющий вклад эффекта аномального возрастания вклада диффузной составляющей и изменение в результате этого вида полной картины рассеяния с изменением толщины кристалла. Этот эффект обеспечивает увеличение чувствительности динамической картины к дефектам в сравнении с кинематической до двух порядков величины. Видоизменение картин на рис. 3 в сравнении с рис. 2 обусловлено определяющим вкладом эффектов Бормана для брэгговской и диффузной составляющих и экстинкции за счет диффузного рассеяния, а также различиями проявления этих эффектов для брэгговской и для диффузной составляющих. При этом эффект экстинкции за счет диффузного рассеяния позволяет повысить чувствительность диагностики дефектов в тонких кристаллах ($\mu_0 t = 1$) до одного порядка вели-

чины, а в толстых кристаллах за счет комбинации этого эффекта экстинкции с эффектом Бормана до трех порядков величины. Рис. 1а, 2а, 3а, 4а и рис. 5 иллюстрируют многообразную чувствительную к характеру влияния дефектов на динамическую картину рассеяния в целом, т.е. многообразие полной картины, при изменении условий дифракции для дефектов разного типа.

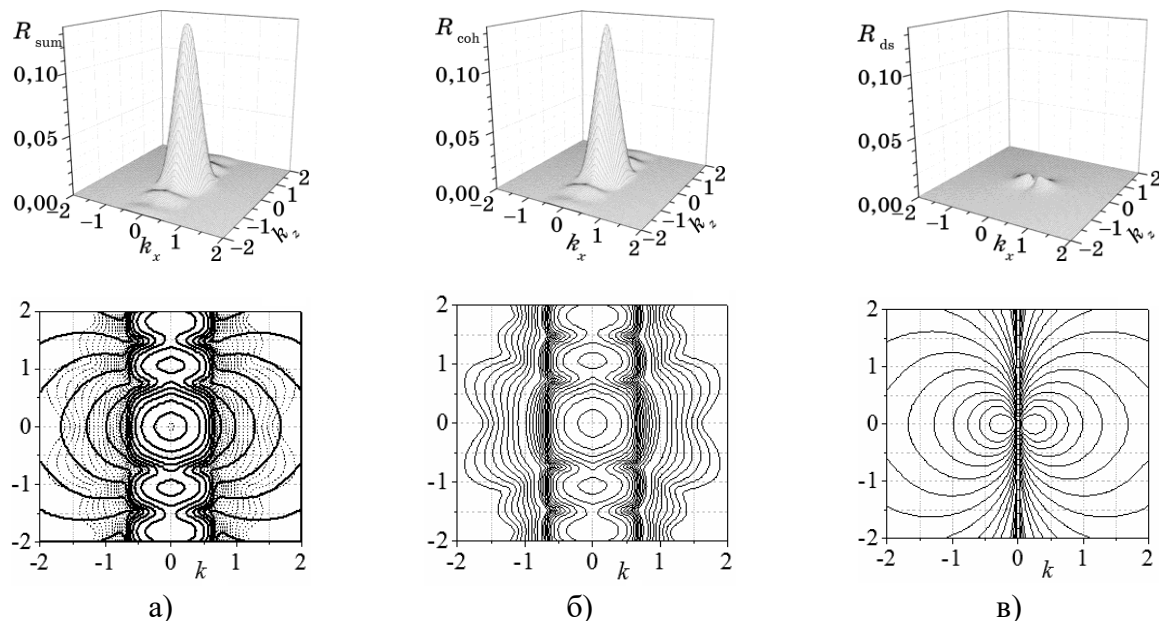


Рис. 1. Двухмерные распределения в плоскости дифракции (вверху) и соответствующие им линии равной интенсивности (внизу) для полной интенсивности дифракции (а), а также ее брэгговской (б) и диффузной (в) составляющих. Случай Лауэ $\text{CuK}\alpha_1$ 220 (сферические преципитаты кислорода в кремнии с $n_c = 4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $R_0 = 0,1 \text{ мкм}$, $R_{\text{eff}} = 0,63 \text{ мкм}$, $\mu_0 t = 0,04$ ($t = \Lambda/7$, $\Lambda = 15,6 \text{ мкм}$ – длина экстинкции), k_x, k_z – отклонения в плоскости рассеяния от узла обратной решетки в единицах обратных межплоскостному расстоянию $d^{-1} \times 10^{-4}$, $L_H = 0,008$, $\mu_{\text{ds}}(0)/\mu_0 = 0,4$ ($\mu_0 = 15686,7 \text{ м}^{-1}$). На карте полной интенсивности дифракции (а) также приведены линии (тонкий штрих) равной интенсивности для идеального кристалла

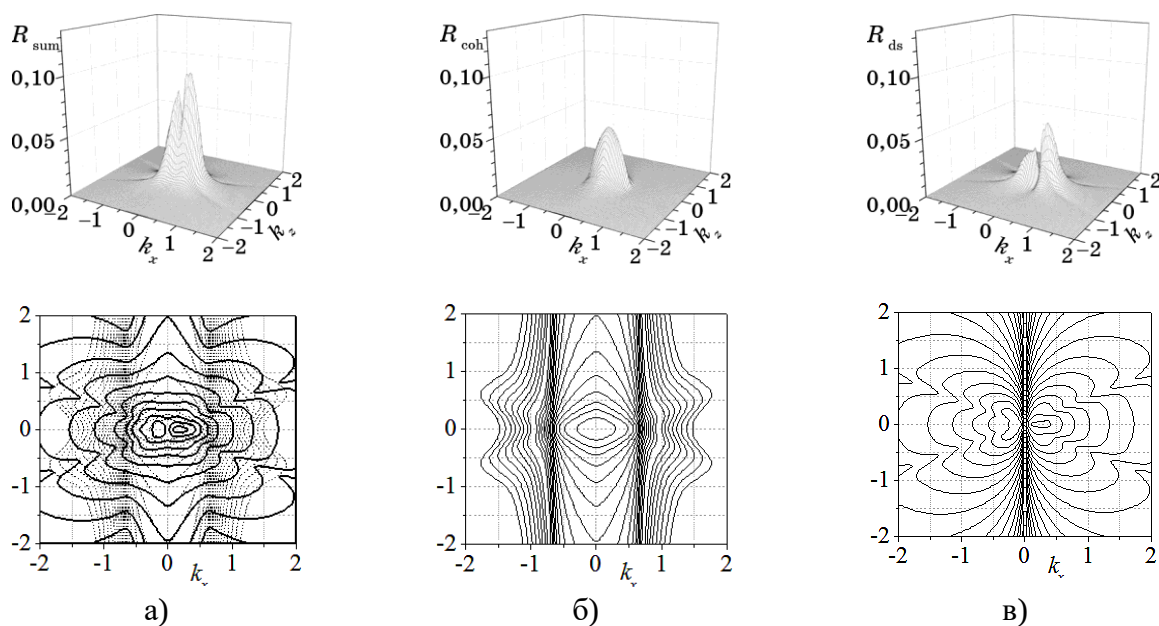


Рис. 2. То же, что и рис. 1, но при $\mu_0 t = 1$ ($t = 65 \text{ мкм}$)

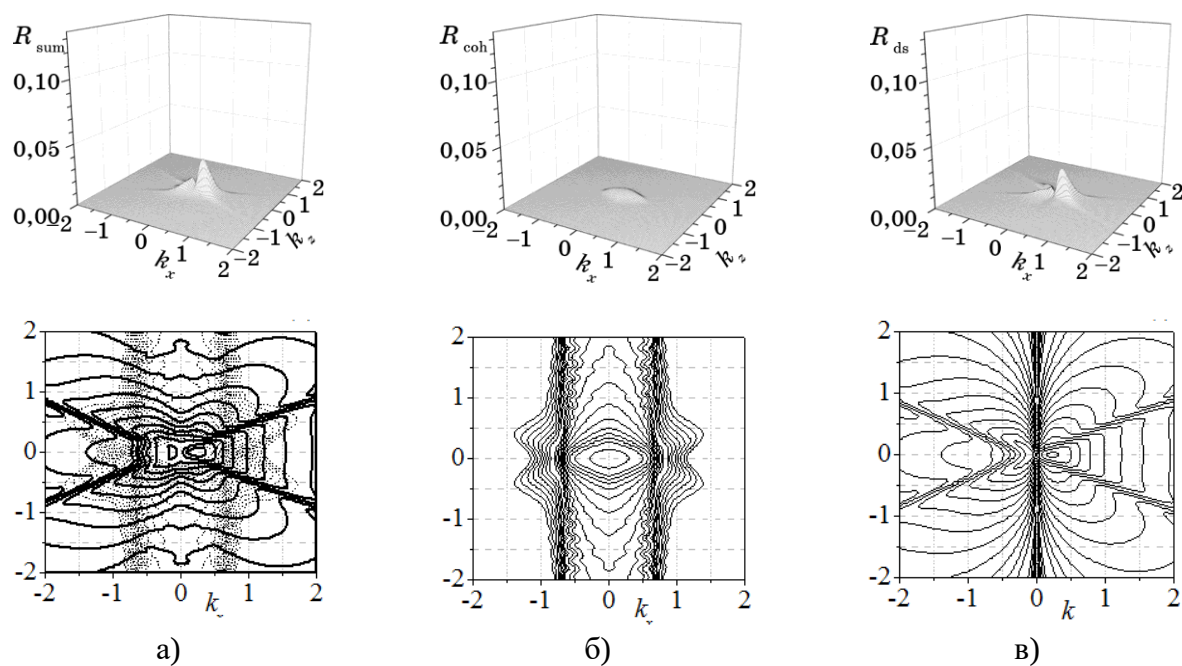


Рис. 3. То же, что и рис. 1, при $\mu_0 t = 5$ ($t = 320$ мкм)

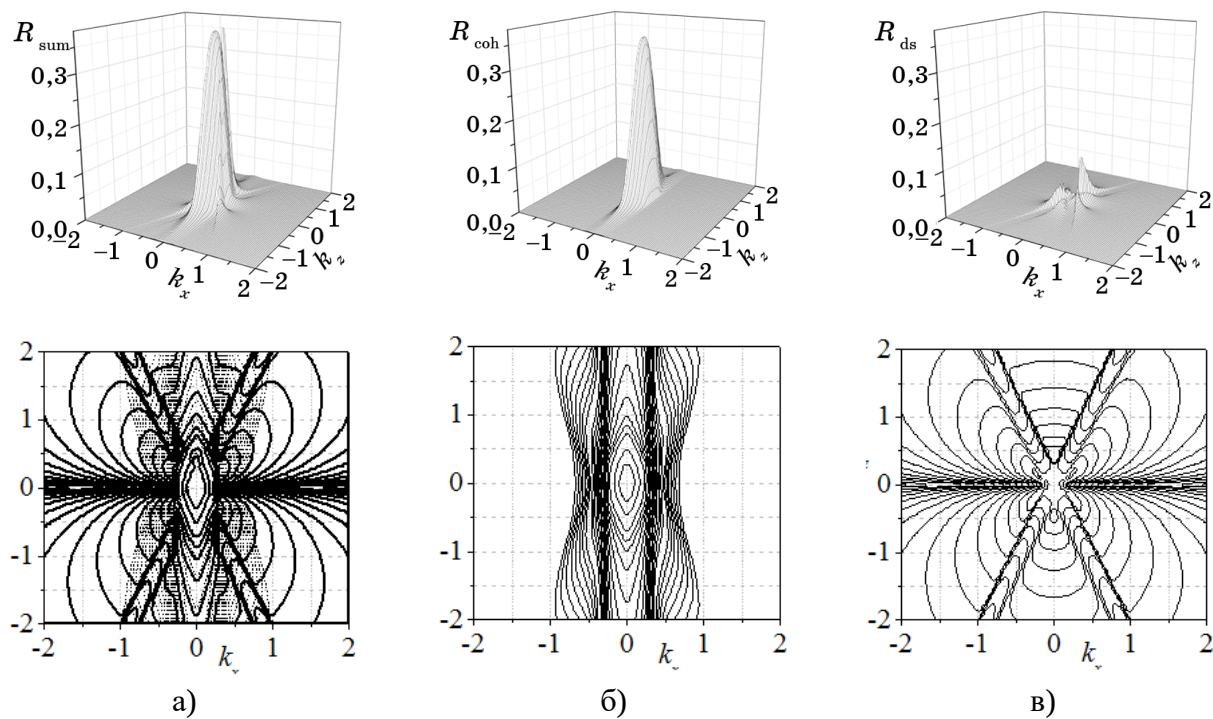


Рис. 4. То же, что и рис. 1, но в случае Брэгга
для $t = 320$ мкм ($\mu_0 t = 11,5$, $\mu_0 = 35818,7 \text{ м}^{-1}$, $\mu_{ds}(0)/\mu_0 = 0,08$).
Иллюстрируется изменение картины за счет изменения геометрии дифракции

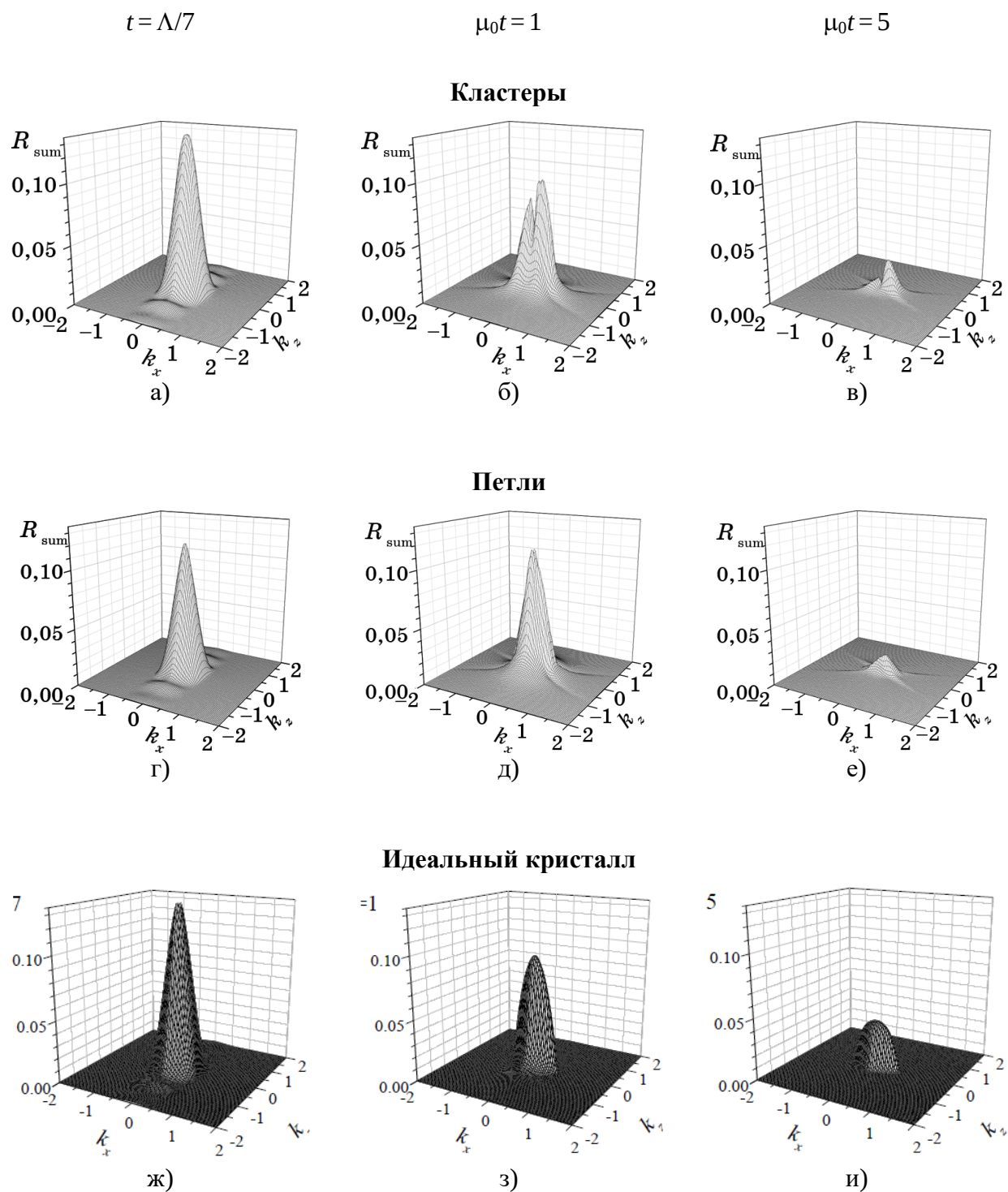
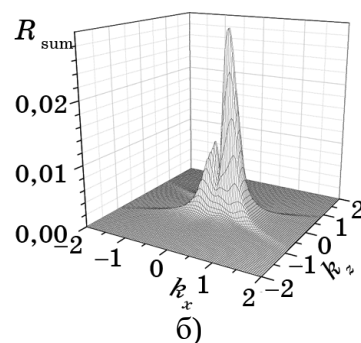
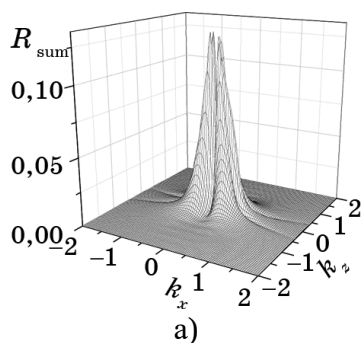


Рис. 5. Распределения полной картины динамического рассеяния при разных толщинах и для разных типов дефектов. Случай геометрии Лауэ, рефлекс $\text{CuK}\alpha_1$ 220: а–в – кластеры (см. подпись к рис. 3); г–е – дислокационные петли с ориентациями вектора Бюргерса $\langle 111 \rangle$ ($n_c = 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $R_0 = 0,1 \text{ мкм}$, $R_{\text{eff}} = 0,35 \text{ мкм}$, $L_H = 0,12$, $\mu_{\text{ds}}(0)/\mu_0 = 0,25$); ж–и – идеальный кристалл

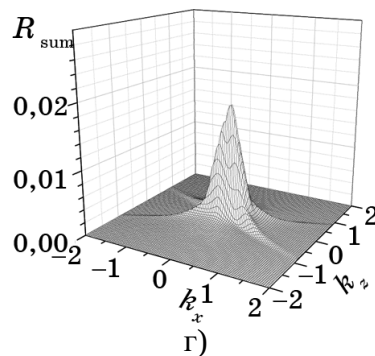
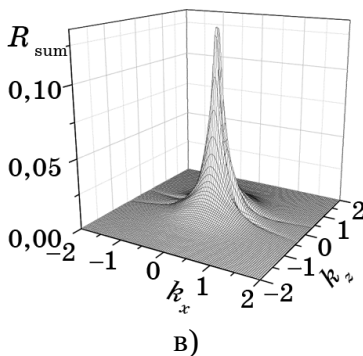
MoK_{α1} 220
(«тонкий» кристалл, $\mu_0 t = 0,5$)

CuK_{α1} 220
(«толстый» кристалл, $\mu_0 t = 5$)

Кластеры



Петли



Идеальный кристалл

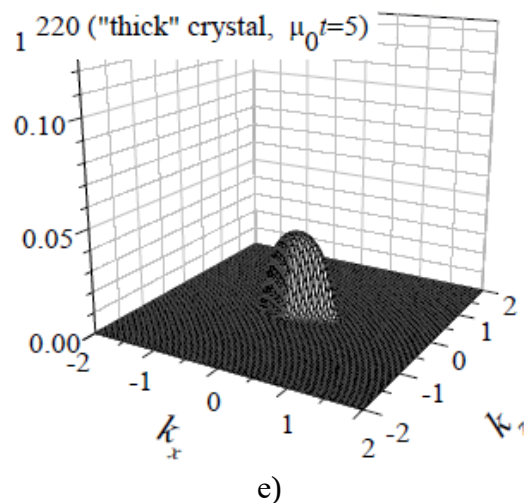
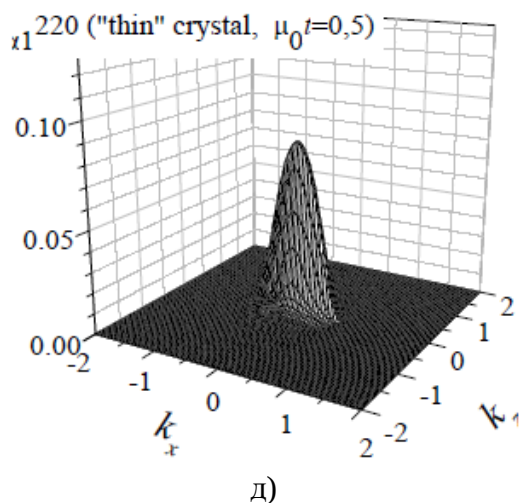
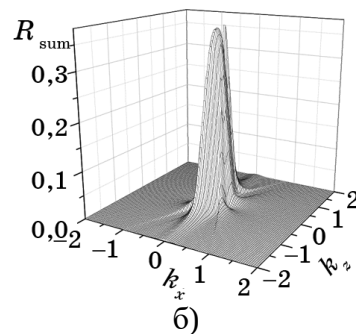
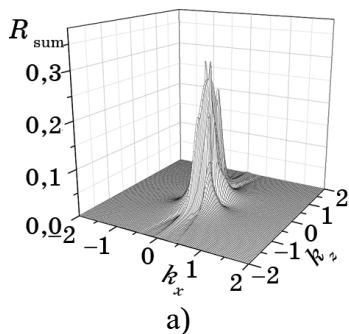


Рис. 6. Распределения полной картины динамического рассеяния в кристалле кремния толщины $t = 320$ мкм для рефлекса 220 в геометрии Лауэ для различных длин волн (a и $в$ – MoK_{α1}; $б$ и $г$ – CuK_{α1}) и разных типов дефектов: a и $б$ – кластеры (см. подпись к рис. 3); $в$ – $г$ – дислокационные петли (см. подпись к рис. 7); $д$ и $е$ – идеальный кристалл

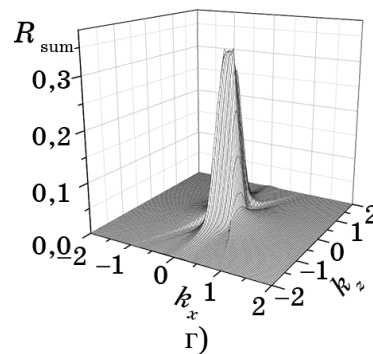
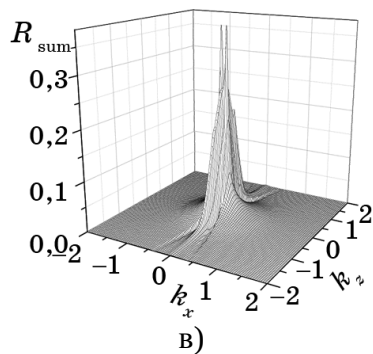
MoK $_{\alpha 1}$ 220
(«тонкий» кристалл, $\mu_0 t = 2,5$)

CuK $_{\alpha 1}$ 220
(«толстый» кристалл, $\mu_0 t = 11,5$)

Кластеры



Петли



Идеальный кристалл

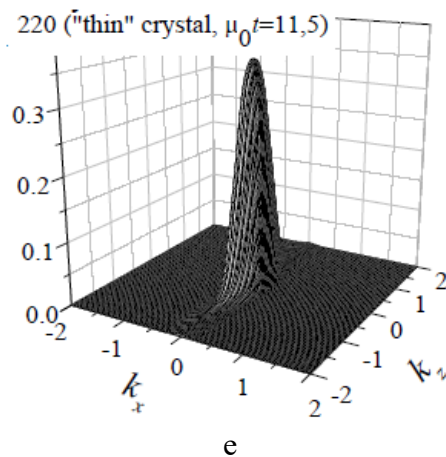
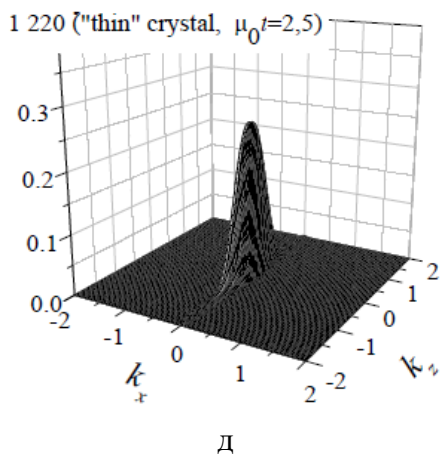
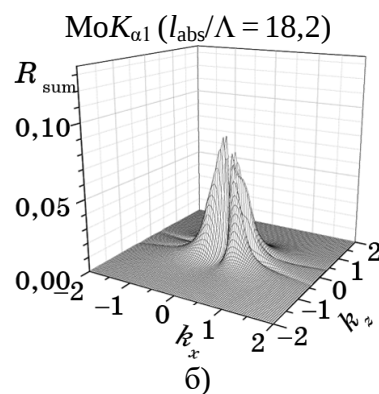
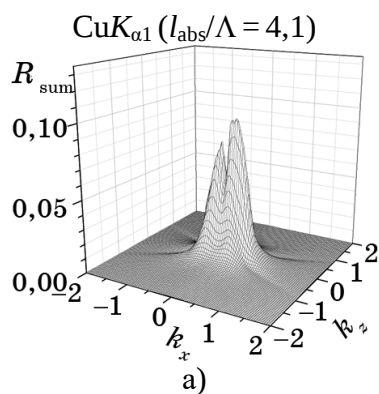
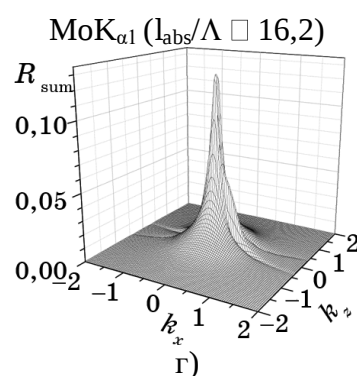
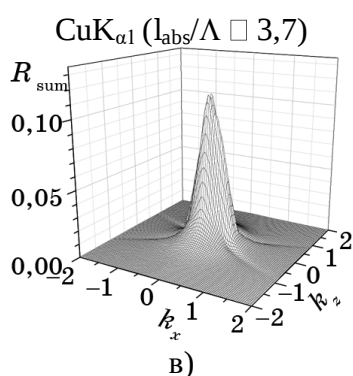


Рис. 7. Распределения полной картины динамического рассеяния в кристалле кремния толщины $t = 320$ мкм для рефлекса 220 в геометрии Брэгга для различных длин волн (a и $в$ – MoK $_{\alpha 1}$; $б$ и $г$ – CuK $_{\alpha 1}$) и разных типов дефектов: a и $б$ – кластеры (см. подпись к рис. 3); $в$ – $г$ – дислокационные петли (см. подпись к рис. 7); $д$ и $е$ – идеальный кристалл

Кластеры



Петли



Идеальный кристалл ($\mu_0 t \square 1$)

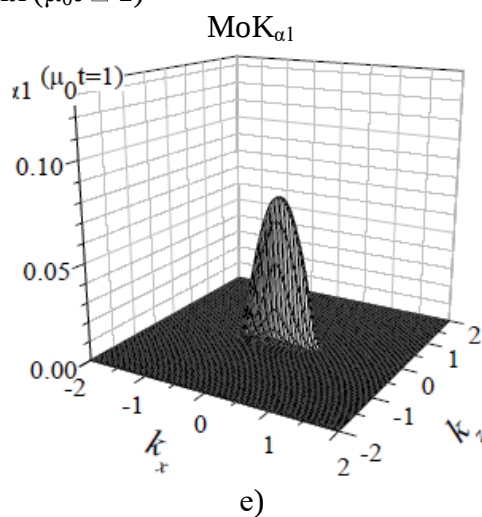
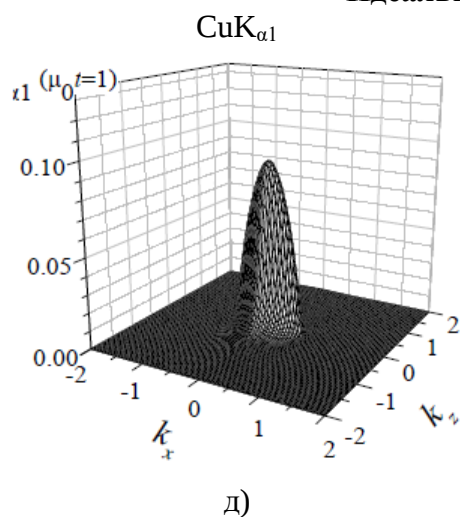
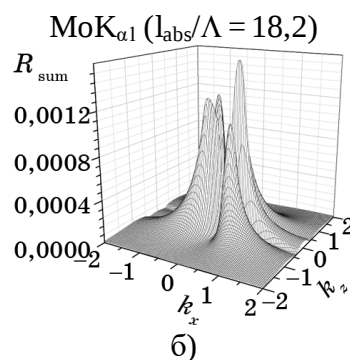
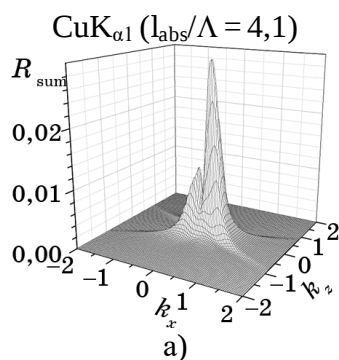


Рис. 8. Распределения полной картины динамического рассеяния для рефлекса Si 220 в геометрии Лауэ для разных типов дефектов и разных длин волн (а и в – $\text{CuK}_{\alpha 1}$; б и г – $\text{MoK}_{\alpha 1}$) при $\mu_0 t = 1$ и, соответственно, при разных отношениях длины поглощения ($l_{\text{abs}} = \mu_0^{-1}$) к длине экстинкции: а–б – сферические преципитаты кислорода (параметры кластеров в подписи к рис. 3, только для рис. б – $t = 700$ мкм и $\mu_{\text{ds}}(0)/\mu_0 = 1,31$); в–г – дислокационные петли с ориентациями вектора Бюргерса $\langle 111 \rangle$ (параметры петель в подписи к рис. 7, только для рис. г – $t = 700$ мкм, $\mu_{\text{ds}}(0)/\mu_0 = 0,67$); д и е – идеальный кристалл

Кластеры



Петли

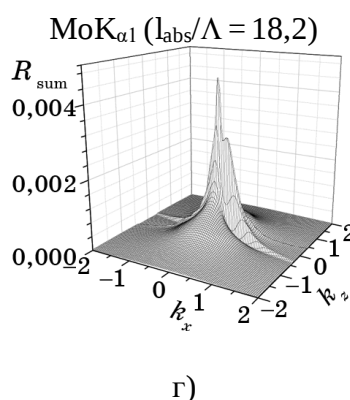
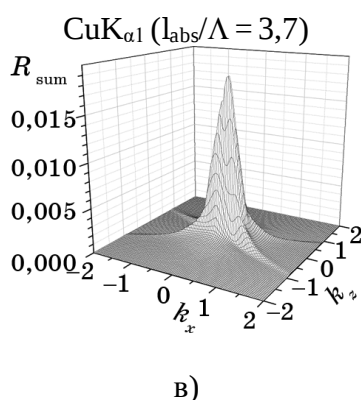
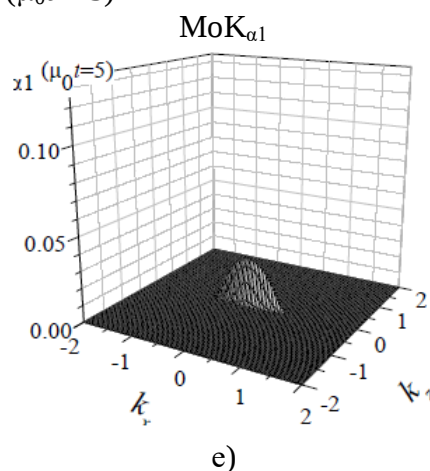
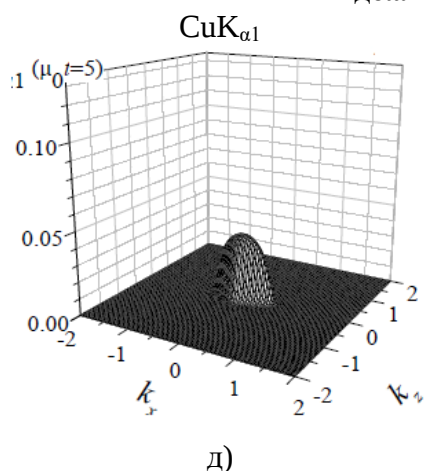
Идеальный кристалл ($\mu_0 t = 5$)

Рис. 9. Распределения полной картины динамического рассеяния для рефлекса Si 220 в геометрии Лауэ для разных типов дефектов и разных длин волн (а и в – $\text{CuK}_{\alpha 1}$; б и г – $\text{MoK}_{\alpha 1}$) при $\mu_0 t = 5$ и, соответственно, при разных отношениях длины абсорбции к длине экстинкции: а–б – сферические преципитаты кислорода (параметры кластеров в подписи к рис. 3 и 10, только для рис. б – $t = 3400$ мкм); в–г – дислокационные петли с ориентациями вектора Бюргерса $\langle 111 \rangle$ (параметры петель в подписи к рис. 7 и 10, только для рис. г – $t = 3400$ мкм); д и е – идеальный кристалл

Таким образом, продемонстрированная на рис. 1–8 динамика картины рассеяния и характера влияния на нее дефектов различного типа при изменении условий дифракции различная для дефектов разного типа, оказывается обусловленной конкуренцией совместного влияния всех механизмов проявления эффектов многократности рассеяния (эффекта экстинкции за счет диффузного рассеяния, эффекта аномального роста вклада диффузной составляющей и интерфе-

ренционного характера отражения и поглощения обеих составляющих), установленных ранее и описанных здесь и ниже более подробно в этой работе. При этом, как следует из анализа, для тонких кристаллов ($\mu_0 t \sim 1$) главную роль играют процессы, связанные с различием влияния эффектов многократности рассеяния и дефектов разного типа на брэгговскую и диффузную составляющие отражательной способности (коэффициента отражения) кристалла, а для толстых кристаллов ($\mu_0 t \gg 1$) – процессы, связанные с различием влияния многократности рассеяния и дефектов разного типа на поглощательные способности (факторы поглощения) для этих составляющих и экстинкцию за счет диффузного рассеяния, т.е. эффективное поглощение.

Как видно из рис. 1–5 в тонких кристаллах основную роль играет эффект аномального возрастания с увеличением толщины кристалла вклада диффузной составляющей, обусловленный различием на несколько порядков величин эффектов экстинкции за счет брэгговского и за счет диффузного рассеяний. В толстых кристаллах главную роль играет различие между брэгговской и диффузной составляющими по характеру влияния дефектов разного типа на проявления для них эффектов Бормана и эффектов экстинкции за счет диффузного рассеяния. При этом результативностью проявления указанных эффектов (рис. 8, 9) оказалось возможным управлять путем изменения наряду с эффективной толщиной кристалла и геометрией дифракции отношения длины абсорбции к длине экстинкции, т.е. изменения вклада диффузной составляющей и вкладов от дефектов разного типа.

Для количественной оценки возможностей увеличения чувствительности диагностики при переходе от кинематического к динамическому рассеянию ниже (рис. 10) проведен анализ профилей трехкристалльных карт пространства обратной решетки.

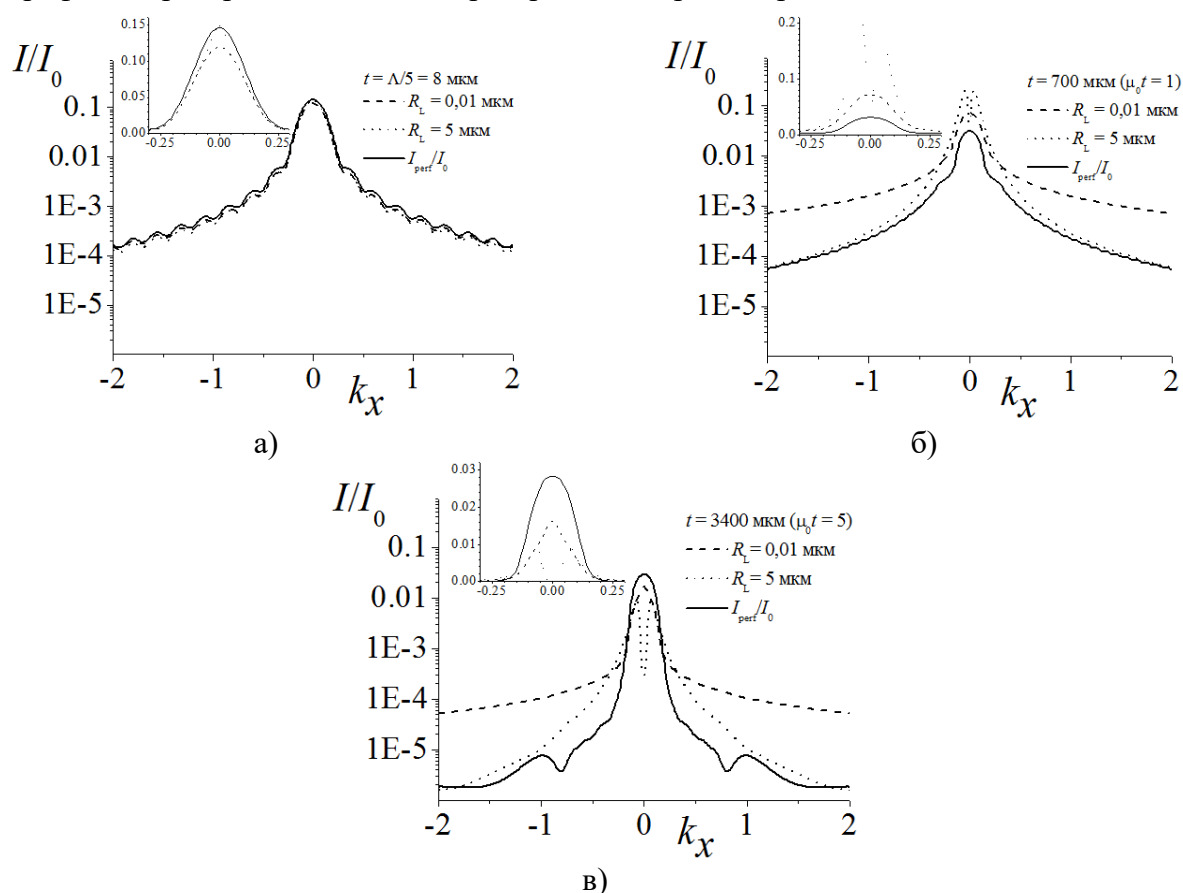


Рис. 10. Изменение характера влияния мелких и крупных дефектов при вариации условий лауэ-дифракции (толщины кристалла) на динамическую картину рассеяния (ТКД-профили полной интенсивности при $k_z = 0$) для кристаллов Si (рефлекс (220), излучение $\text{MoK}\alpha_1$): а) – кинематический предел, б) – динамически тонкий и в) – динамически толстый кристаллы. Концентрации дислокационных петель двух радиусов выбраны так, чтобы среднеквадратичные смещения атомов матрицы были одинаковы ($L_H = 0.12$)

На рис. 10 представлены трехкристальные профили полной интенсивности лауэ-дифракции для монокристаллов Si различных толщин, содержащих дислокационные петли с вектором Бюргерса $\langle 111 \rangle$ большого ($R_L = 5$ мкм с концентрацией $n_c = 3.2 \times 10^7 \text{ см}^{-3}$) и малого ($R_L = 0.01$ мкм, $n_c = 4 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$) радиусов, а также интенсивности дифракции от соответствующих бездефектных (идеальных) монокристаллов. Как видно из приведенных на рис. 10а данных, полученных в кинематическом пределе, отличия между интенсивностями дифракции для идеального кристалла и для кристаллов с дефектами минимальны и во всем угловом диапазоне не превышают 5–20 %. При переходе к толщинам, обеспечивающим динамическую дифракцию (рис. 10б и в), наблюдается не только кардинальное (на порядки) возрастание абсолютной величины отклонений интенсивности дифракции для кристаллов с дефектами от аналогичной величины для идеального кристалла, но и даже изменение знака этого отклонения при переходе от динамически тонких к толстым кристаллам. Так на рис. 10б наблюдается увеличение полной интенсивности рассеяния кристаллами с дефектами (различное для дефектов разных типов), по сравнению с идеальным кристаллом, в основном, из-за эффекта аномального роста вклада диффузного рассеяния, обусловленного различием на порядки величины длин экстинкции за счет брэгговского и за счет диффузного рассеяния и, соответственно, различных объемов кристалла, формирующих когерентную и диффузную составляющие интенсивности рассеяния. Кроме того, более существенное в сравнении с кинематическим случаем изменение динамической картины наблюдается за счет интерференционного характера отражательной способности кристалла. Однако, при переходе к толстому кристаллу (рис. 10в) дефекты начинают уменьшать интенсивность рассеяния, т.к. основную роль в этих условиях дифракции играют интерференционные эффекты в отражательной и, особенно, в поглощательной способностях кристалла (эффект Бормана). При этом определяющей оказывается роль эффектов экстинкции из-за диффузного рассеяния, что особенно заметно для кристалла с крупными дефектами.

Таким образом, с изменением условий дифракции изменяются определяющие механизмы эффектов многократности и соотношение вкладов брэгговской и диффузной составляющих и вкладов от дефектов разного типа, и это приводит к радикальному усилению и к изменению характера (и даже знака) влияния дефектов на динамическую картину рассеяния, т.е. дефекты могут как уменьшать, так и увеличивать интенсивность рассеяния в любой точке пространства обратной решетки, как и интегральную интенсивность, по сравнению с таковой в идеальном кристалле и при этом очень существенно (на порядки величины). Различие зависимостей всех перечисленных здесь эффектов многократности рассеяния от характеристик дефектов разного типа также, как и от условий дифракции, обеспечивают уникально чувствительную к характеристикам дефектов многообразность динамической картины, связанную с зависимостью от условий дифракции характера результирующего влияния дефектов разного типа на картину рассеяния, и обуславливают качественно новые функциональные возможности информативности диагностики, в частности, возможность многопараметрической диффрактометрии.

1.3. Радикальное различие влияния характеристик дефектов в кристаллах и условий дифракции на кинематическую и динамическую картины рассеяния рентгеновских лучей, нейтронов, электронов и других заряженных частиц

1.3.1. Кинематический случай

Потенциал рассеяния излучения в кристаллах с дефектами, в отличие от такового для идеального кристалла, становится непериодическим и зависящим от случайных переменных, характеризующих распределение дефектов в кристалле. В теории Кривоглаза [7] такой непериодический потенциал представлен в виде суммы двух слагаемых. Первое из них – это усреднённый по случайным переменным при фиксированных параметрах кристалла потенциал, который становится периодическим при хаотическом (однородном) распределении дефектов. При этом параметр периодичности отличается от аналогичного в идеальном кристалле. Второе слагаемое – флуктуационная часть, описывающая отклонения от этой новой периодичности. Периодическая

часть, в отличие от модели потенциала для идеального кристалла, оказывается зависящей от статистических характеристик дефектов (в основном за счёт фактора Кривоглаза – Дебая – Валлера, который Кривоглаз называл статическим фактором Дебая – Валлера) и описывает брэгговское рассеяние, которое непосредственно формируется соответствующей периодической частью потенциала реального кристалла. Зависимости интенсивности брэгговского рассеяния от других параметров, характеризующих условия дифракции, остаются такими же, как и в идеальном кристалле, и описываются отдельным множителем.

Часть потенциала реального кристалла, соответствующая введенному флуктуационному слагаемому, непосредственно формирует диффузное рассеяние (ДР), распределение интенсивности которого в пространстве обратной решётки, выраженное Кривоглазом с помощью разработанного им метода флуктуационных волн через характеристики дефектов, оказалось наиболее информативным при диагностике дефектов по характеру их результирующего влияния на полную кинематическую картину рассеяния (сумму ее брэгговской и диффузной составляющих). При этом характер такого влияния для любого фиксированного рефлекса не зависит от параметров, определяющих условия дифракции, как для случая интегральной полной интенсивности рефлекса, так и для распределения ее значений в каждой точке пространства обратной решетки. Последнее связано с тем, что появление дефектов всегда приводит к уменьшению брэгговской составляющей рассеяния и увеличению диффузной, а характер результирующего влияния дефектов на полную (суммарную) интенсивность определяется соотношением вкладов этих составляющих.

Как показывает анализ, в кинематической теории указанное соотношение определяется характеристиками дефектов и зависит только от вектора рассеяния, т.е. от положения точки наблюдения в пространстве обратной решетки, но не зависит ни от каких-либо других условий дифракции, поскольку зависимости обеих составляющих от этих условий оказываются одинаковыми (такими, как в идеальном кристалле, для каждой из составляющих – как интегральных, так и составляющих для любой отклоненной от узла точки пространства обратной решетки) и не влияют на их отношение. При этом важно, что зависимости как брэгговского, так и диффузного рассеяний от волновых векторов и характеристик дефектов, с одной стороны, и от условий дифракции, с другой, факторизуются и не влияют одна на другую. Распределение диффузного рассеяния в пространстве обратной решетки оказывается прямым однозначным Фурье-изображением полей смещений атомов от дефектов в кристалле. Полуширина или интегральная ширина брэгговских распределений от дефектов не зависят и определяются только размером и формой кристалла (функцией формы), а зависимость брэгговской интенсивности от характеристик дефектов определяется только отдельным фактором Кривоглаза – Дебая – Валлера, который для фиксированных отражений не зависит от условий дифракции.

1.3.2. Случай динамического рассеяния

При динамической дифракции, как следует из анализа формул (1)–(15), а также результатов работ [21–25] и раздела 1.2 настоящей статьи, вследствие многократности процессов рассеяния как брэгговская, так и диффузная составляющие интенсивности (обе) формируются процессами многократных перерассеяний последовательно между обеими частями потенциала. Это приводит к тому, что *динамическое брэгговское рассеяние* описывается не средним, как у Кривоглаза, а дополнительно перенормированным за счёт перерассеяния на флуктуационной части эффективным периодическим потенциалом (комплексным и нелокальным). Этот эффективный потенциал существенно отличается от среднего по конфигурациям дефектов.

Главное отличие – *появление уникально структурночувствительного фактора экстинкции вследствие диффузного рассеяния* [21]. Это новое фундаментальное понятие динамической теории впервые введено в работе В.Б. Молодкина и Е.А. Тихоновой [21], в которой установлены физическая природа и зависимости этого фактора от характеристик дефектов и условий дифракции. Однако на взаимосвязанный характер этих зависимостей внимание было обращено только в последние годы. Данный фактор описывает предсказанный авторами работы [21] эффект ослабления брэгговских и диффузных волн вследствие их рассеяния на отклонениях от периодичности потенциала (первоначально названный эффектом эффективного

поглощения). При этом за счет эффекта, описываемого этим фактором, а также эффектов влияния дефектов за счет учета фактора Кривоглаза – Дебая – Валлера на связанные непосредственно с многократностью рассеяния на самом эффективном периодическом потенциале динамические эффекты, коллективизации плоских проходящей и дифрагированной волн в блоховские (стоячие) волновые поля, обуславливающие интерференционный характер взаимодействия поля с кристаллом как при отражениях, так и при поглощении, интенсивность брэгговских отражений, оказалась значительно более чувствительной к характеристикам дефектов при динамической дифракции, чем таковая в кинематическом случае, определяемая только влиянием фактора Кривоглаза – Дебая – Валлера на амплитуду однократного рассеяния, т.е. фурье-компоненту периодического усредненного потенциала.

Кроме того, появились отличия от кинематического случая в зависимости интенсивности брэгговских отражений от условий дифракции, которая теперь из-за динамических интерференционных эффектов и, следовательно, блоховского характера закона дисперсии для рассеянных в кристаллах частиц, стала ориентационнозависимой, т.е. существенно различной для разных волновых векторов рассеивающегося излучения (разных отклонений от точного условия Вульфа – Брэгга), причем эта зависимость «перепуталась» с зависимостью от характеристик дефектов. То есть эти зависимости от условий дифракции и характеристик дефектов интенсивности брэгговских отражений стали существенно усиленными и взаимосвязанными вследствие появления как указанного выше фактора экстинкции из-за диффузного рассеяния, так и отмеченного эффекта усиления зависимости от характеристик дефектов за счет фактора Кривоглаза – Дебая – Валлера, зависящих от условий дифракции коэффициентов интерференционных как отражения, так и поглощения, что описано в разделе 1 настоящей статьи.

Главной динамической особенностью диффузного рассеяния в соответствии с формулами раздела 1 оказалась обнаруженная существенная зависимость характера его распределения в пространстве обратной решетки не только от характеристик дефектов, но и от условий дифракции, т.е. взаимосвязь зависимостей картины диффузного рассеяния от условий дифракции и от характеристик дефектов. При этом сами зависимости непосредственно от характеристик дефектов существенно усилились и усложнились по сравнению с кинематическими за счет эффектов многократности и также «перепутались» с зависимостями от параметров, определяющих условия дифракции. Зависимости от условий дифракции, в свою очередь, стали зависеть отдельно от начал ($\Delta\theta$) и от определяемых характеристиками дефектов распределений концов ($\Delta\theta'$) векторов рассеяния (см. раздел 1).

Как показано в [21–25], многократное перерассеяние диффузных волн на периодической части потенциала преобразует их в блоховские волновые поля, для которых в [26–28] были предсказаны *эффекты аномального прохождения и экстинкции диффузного рассеяния*, получившие многократное теоретическое [72–74] и экспериментальное [49] подтверждения. Указанные эффекты *изменяют характер картины диффузного рассеяния при фиксированной дефектной структуре за счёт изменения только дифракционных параметров, причём существенно сильнее, чем за счёт изменения самих характеристик дефектов*, что иллюстрируется на рис. 11 и 12.

Из рис. 11 видно, как радикально изменяются с возрастанием эффективной толщины кристалла трехмерные изображения, показывающие распределение интенсивности диффузного рассеяния в пространстве обратной решетки для кристалла кремния, содержащего мелкие сферические кластеры. При этом (рис. 11в) в отличие от случая эффекта Бормана в идеальных кристаллах появляются не один, а два хребта, один из которых, обусловленный эффектом аномального прохождения (стоячим характером волнового поля) брэгговской составляющей, соответствует точному брэгговскому положению ($\Delta\theta = 0$) падающего луча (монохроматора), а другой, обусловленный аномальным прохождением (стоячим характером волнового поля) диффузных волн, соответствует точному брэгговскому положению ($\Delta\theta' = 0$) дифрагированного луча (анализатора). Кроме того, на пересечении этих хребтов появляется высокий пик, связанный с совместным действием указанных эффектов. Следует отметить, что пик на рис. 11в в 40 раз выше, чем каждый из двух пиков на рис. 11а (при одном масштабе).

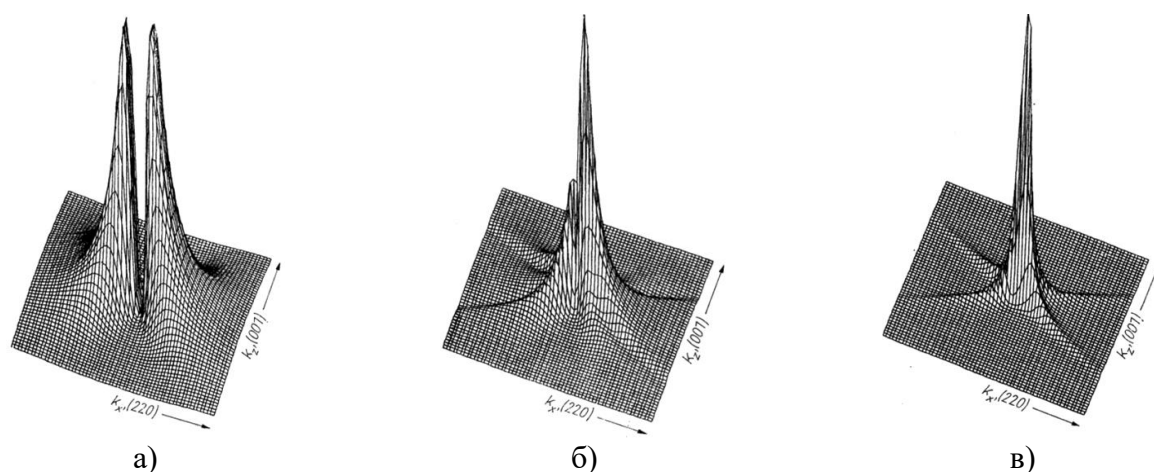


Рис. 11. Изменение картины рассеяния (трёхмерных изображений двумерных распределений интенсивности диффузного рассеяния в плоскости дифракции) с увеличением толщины t кристалла от $\mu_0 t = 0.027$ (а) до $\mu_0 t = 1.34$ (б) и $\mu_0 t = 5.36$ (в) иллюстрирует явление аномального прохождения диффузного рассеяния (μ_0 – коэффициент фотоэлектрического поглощения)

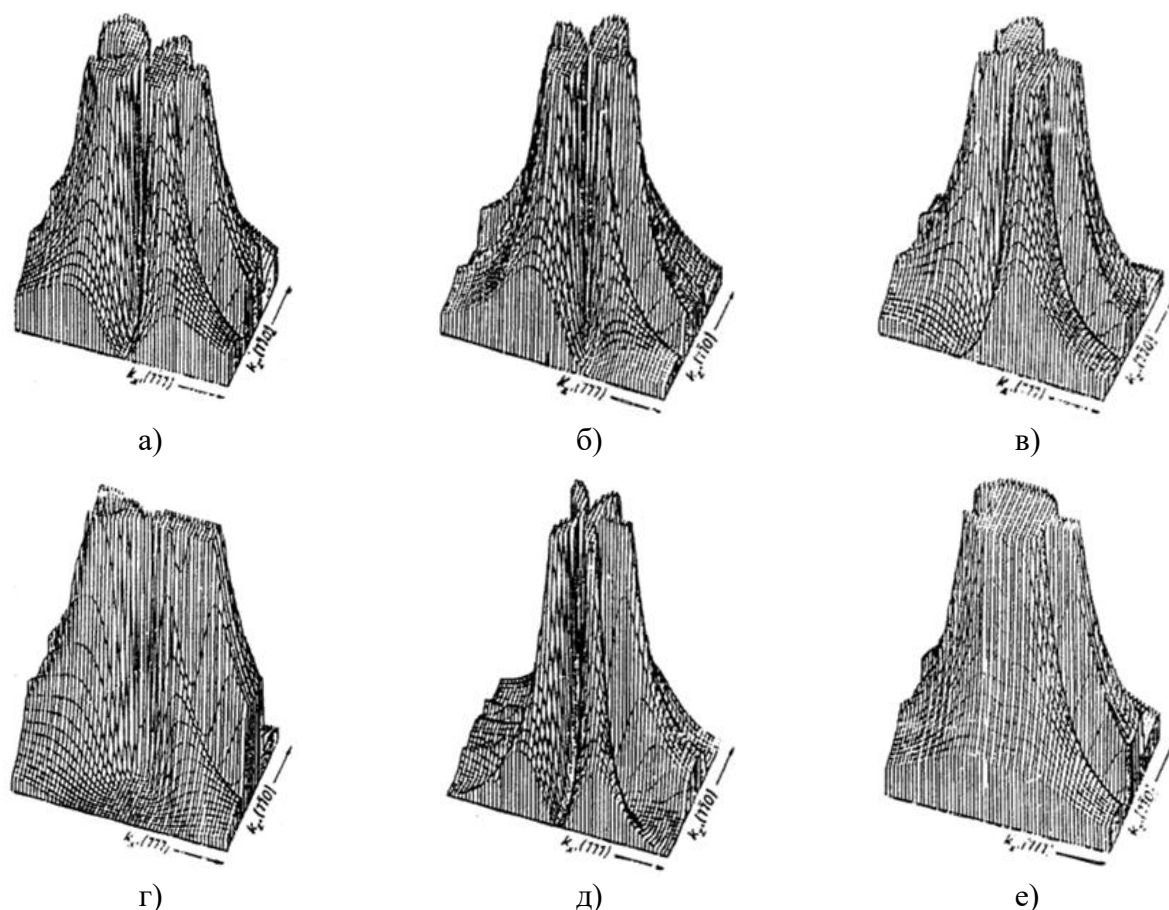


Рис. 12. Рентгеновские Фурье-изображения полей смещений вокруг дефектов разного типа (дислокационных петель различной ориентации) [28]

В динамической картине эффекты многократного рассеяния вследствие их зависимости отдельно от начала и от конца вектора дифракции, т.е. от отклонения падающего луча от точного условия Вульфа – Брэгга и от расположения точки наблюдения в пространстве обратной решетки относительно узла обратной решетки, как бы маскируют прямое (кинематическое) влияние дефектов, которое при диагностике необходимо демаскировать, используя соответствующие

формулы динамической теории. Дело в том, что в кинематической теории зависимости от условий дифракции как отражающей, так и поглощающей способностей кристалла для брэгговской и диффузной составляющих одинаковы, при этом не зависят от характеристик дефектов и от отклонений от точного условия Вульфа – Брэгга или от отклонения точки наблюдения в пространстве обратной решетки относительно исследуемого узла обратной решетки. В свою очередь распределения интенсивностей рассеяния в пространстве обратной решетки определяются функцией формы, т.е. только формой и размерами кристалла, и распределением в обратном пространстве фурье-компонент полей смещений атомов от дефектов.

Вид картины рассеяния (характер распределений интенсивности дифрагированного излучения в пространстве обратной решетки) в кинематической теории не зависит от условий дифракции, и, следовательно, характер влияния дефектов на кинематическую картину рассеяния также не зависит от этих условий.

В динамической теории появляется зависимость как от отклонения падающего луча от точного условия Вульфа – Брэгга, так и от отклонений относительно узла обратной решетки конца вектора диффузного рассеяния, т.е. от положения исследуемой точки в пространстве обратной решетки, как коэффициента преломления, так и коэффициента поглощения, и, следовательно, отражающей и поглощающей способностей кристалла, которые и определяют зависимость картины рассеяния от условий дифракции. В результате при динамической дифракции из-за динамических интерференционных эффектов и, следовательно, блоховского характера закона дисперсии для рассеянных в кристаллах частиц эта зависимость от условий дифракции оказывается различной для разных точек пространства обратной решетки. Таким образом, условия дифракции по-разному влияют на картину рассеяния в различных областях пространства обратной решетки, т.е. влияние условий динамической дифракции приобретает ориентационную зависимость от отклонений направлений падающих на кристалл ($\Delta\theta$) и выходящих ($\Delta\theta'$) лучей относительно условий Вульфа-Брэгга. А поскольку дефекты разного типа дают определяющий вклад в различные области пространства обратной решетки, то зависимости распределения интенсивности рассеянного излучения в пространстве обратной решетки от характеристик дефектов и от условий дифракции оказываются взаимосвязанными за счет указанных ориентационных зависимостей и, следовательно, появляется возможность управлять вкладами дефектов разного типа в картину рассеяния целенаправленным усилением вкладов определенных областей пространства обратной решетки путем изменения условий дифракции при динамическом рассеянии. Такая возможность принципиально отсутствует при кинематическом рассеянии и возникает только при динамической дифракции. По сути здесь раскрывается природа эффекта изменения избирательности чувствительности динамической картины к дефектам разного типа при изменении условий дифракции, который впервые был установлен для случая интегральной дифрактометрии кристаллов с дефектами нескольких типов в работе [35].

Таким образом, в кинематической картине рассеяния распределение интенсивности в пространстве обратной решетки определяется соответствующим распределением в обратном пространстве фурье-компонент поля смещений, вызванных дефектами, и характер этого распределения не зависит от условий дифракции.

При динамической дифракции распределение интенсивности в картине рассеяния определяется конкуренцией распределений в пространстве обратной решетки фурье-компонент полей смещений атомов от дефектов и возникающего только при динамическом рассеянии распределения в обратном пространстве величин множителей, которые зависят от условий дифракции по-своему для каждого типа дефектов. В результате при динамической дифракции характер влияния дефектов на динамическую картину рассеяния зависит взаимосвязанным образом как от характеристик дефектов, так и от условий дифракции. При этом указанные зависимости определены в рамках построенной динамической теории, что обеспечивает возможность их целенаправленного изменения для повышения информативности динамической дифрактометрии. Отметим, что работа [28] была первым шагом, касающимся только диффузного рассеяния, на пути к раскрытию природы многообразности динамической картины рассеяния в целом, связанной с изменением характера влияния дефектов на

эту картину при изменении условий дифракции. Установленные зависимости картин диффузного рассеяния от толщины (рис. 11) более существенны, чем от типа дефектов, представленные на рис. 12, по причинам, которые впервые детально излагаются в настоящем обзоре.

Следует отметить, что дальнейшие обобщения динамической теории рассеяния в кристаллах с дефектами, созданной в [21–28], и ее развитие, направленное на совершенствование и создание более общих методических подходов, а также расширения областей их применимости успешно реализованы в последующих работах [29–85], результаты которых подтверждают те основные результаты и выводы работ [21–28], которые представлены в настоящем обзоре. Кроме того, следует отметить ставшую классической работу Като [81], которая по названию совпадает с тематикой работ [21–80, 82–85], поскольку также посвящена созданию статистической динамической теории дифракции. Однако в работе Като вообще не рассматриваются кристаллы с дефектами, а решается проблема статистических усреднений по мозаичности кристаллов. Никаких формул, связывающих распределение интенсивности дифракции в пространстве обратной решетки либо интегральную интенсивность рассеяния с характеристиками конкретных дефектов, теория Като, в отличие от теории, развитой в [21–80, 82–85], не дает. При этом, как и большинство работ [75–80], теория Като основана на решении уравнений Такаги, которые справедливы только для плавных полей смещений, и по этой причине неприменимы или недостаточно корректны количественно для микродефектов, особенно наноразмерных дефектов.

Таким образом, первый шаг к пониманию явления многообразности полной динамической картины рассеяния был реализован [28] еще в 1988 г., когда была показана принципиальная возможность управления характером распределения диффузной составляющей картины рассеяния при динамической дифракции посредством изменения толщины образца, что в принципе не может быть осуществлено при кинематическом рассеянии.

Следует отметить, что обнаруженная многообразность характера распределения диффузного рассеяния качественно отличается не только более сложным характером проявления собственно эффектов многократности для диффузного рассеяния от известной многообразности динамической картины рассеяния в идеальных кристаллах, обусловленной возникающей из-за динамических интерференционных эффектов (и, следовательно, блоховского характера закона дисперсии для частиц, рассеянных в кристаллах) зависимостью коэффициентов преломления и поглощения (а значит, и определяемого ими характера влияния условий дифракции на интенсивность рассеяния) от положения точки наблюдения в пространстве обратной решетки.

Главное отличие состоит в том, что в идеальных кристаллах многообразность, хотя она и обусловлена эффектами многократности (однако только брэгговского рассеяния), не связана с изменением характера влияния дефектов на картину рассеяния при изменении условий дифракции. Дефекты и диффузное рассеяние в идеальном кристалле вообще отсутствуют, однако, в случае кристаллов с дефектами из-за возникновения конкуренции влияния положений и начала ($\Delta\theta$) и конца ($\Delta\theta'$) вектора рассеяния на зависимости картины рассеяния от характеристик дефектов и от условий дифракции, которое и обеспечивает взаимосвязь этих зависимостей, а также из-за появления дополнительно «перепутывающих» эти зависимости динамических факторов (таких, как фактор диффузной экстинкции, фактор интерференционных отражения и поглощения и др.) и, кроме того, из-за взаимосвязи через $\Delta\theta$ и $\Delta\theta'$ влияния и характеристик дефектов и условий дифракции даже на сам пакет стоячих диффузных волн, многообразность динамической картины диффузного рассеяния приобретает новое в сравнении с многообразностью в идеальных кристаллах, существенно повышающее информативность диагностики, качество. А именно, появляется структурная чувствительность многообразности, т.е. связь многообразности с изменением характера влияния дефектов на динамическую картину рассеяния при изменении условий дифракции. Причем именно это изменение характера влияния дефектов, зависящее и от типа дефектов, непосредственно участвует в формировании конкретного характера наблюдаемой многообразности картин, а не только самого факта многообразности.

Как отмечено, это обусловлено совместным влиянием на динамическую картину рассеяния зависимости от положения точки наблюдения в пространстве обратной решетки не только факторов, описывающих влияние характеристик дефектов, но и появившейся аналогичной зависимости факторов, характеризующих влияние условий дифракции. В результате теперь многообразность картины – это, в том числе, и многообразность характера влияния дефектов на картину в разных условиях дифракции, обеспечивающая ее структурную чувствительность с повышенной информативностью.

Вторым шагом, который увеличил структурные чувствительность и информативность за счет многообразности, оказалось предсказание в [39–42] эффекта аномального возрастания с увеличением толщины кристалла вклада диффузной составляющей, который был обусловлен установленным в этих работах существенным различием (на несколько порядков величины) эффектов экстинкции вследствие брэгговского и вследствие диффузного рассеяний. Этот эффект изменения вклада диффузного рассеяния с изменением толщины, как впервые указано в работах [8–15], существенно усилил отмеченную зависимость от условий дифракции характера влияния дефектов на полную картину рассеяния и стал одним из основных факторов, определяющих информативность диагностики в случае динамической дифракции. Это происходит, как показано в [8–15], за счет открытой [39–42] зависимости от толщины кристалла (а в последствии открытой в [8–15] зависимости и от других условий динамической дифракции) соотношения вкладов в картину рассеяния ее брэгговской и диффузной составляющих, которые в кинематическом случае определяются только типом и характеристиками дефектов.

Описанные эффекты, установленные в отдельных отмеченных выше случаях [21–28, 39–42], оказались, как показано в разделе 2, частными механизмами, конкуренция между которыми и обеспечивает возникновение установленного и описанного в последствии в работах [8–15] общего явления зависимости от условий дифракции (не только от толщины, но и от любых других факторов) характера результирующего влияния дефектов на полную картину рассеяния, т.е. явления многообразности полной динамической картины рассеяния в кристаллах с дефектами, которое существенно повышает информативность и улучшает и другие функциональные возможности диагностики дефектов, основанной на открытой уникальной структурной чувствительности зависимостей картины динамического рассеяния от параметров, характеризующих условия дифракции.

1.4. Обоснование путем моделирования целесообразности использования эффекта многообразности и комбинированного подхода для создания многопараметрической диагностики монокристаллов с дефектами нескольких типов

Для иллюстрации возможности многопараметрической диагностики, основанной на динамической теории, проведен численный эксперимент. Смоделирована «экспериментальная» картина рассеяния для кристалла с дефектной структурой, приведенной во второй колонке таблицы 1, с учетом точности реального эксперимента, обеспечивающей наилучшую подгонку с R -фактором $\sim 4\div 5$ %. Как видно из табл. 1 в случае кинематически тонкого кристалла как истинная дефектная структура (вторая колонка таблицы), так и восстановленные в результате независимой подгонки (третья и четвертая колонки таблицы), дают одинаково хороший результат (R -фактор на уровне погрешности эксперимента $\sim 4\div 5$ %), т.е. приведенные в таблице дефектные структуры в кинематическом подходе неразличимы. При изменении условий дифракции (увеличении эффективной толщины кристалла, например, за счет изменения длины волны излучения) картина рассеяния, предсказываемая кинематической теорией, изменяться не будет. В то же время, в динамической теории при переходе к динамически «тонкому» и «толстому» кристаллам из-за причин, изложенных выше, которые обусловили многообразность динамической картины дифракции, различия между картинами рассеяния для приведенных в табл. 1 структур дефектов нескольких типов увеличатся (увеличится R -

фактор для восстановленных дефектных структур), т.е. всем экспериментальным условиям будет удовлетворять только истинная дефектная структура.

Таблица 1

Количественные характеристики (R -фактор) отклонения «экспериментальной» картины рассеяния от картин рассеяния, смоделированных для трех типов дефектных структур, в зависимости от условий дифракции (эффективной толщины кристалла)

Параметры дефектов Условия дифракции	Истинные два типа петель $R_1 = 200\text{нм}$, $n_1 = 2,05 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$; $R_2 = 100\text{нм}$, $n_2 = 1,54 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$	Восстановленные два типа петель $R_1 = 180\text{нм}$, $n_1 = 2,87 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$; $R_2 = 110\text{нм}$, $n_2 = 1,2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$	Восстановленный один тип петель $R_1 = 150\text{нм}$, $n_1 = 9,43 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$
Кинематически «тонкий» кристалл ($\mu_0 t = 0,03$)	4,88 %	4,89 %	4,91 %
Динамически «тонкий» кристалл ($\mu_0 t = 1$)	4,56 %	6,42 %	7,33 %
«толстый» кристалл ($\mu_0 t = 10$)	4,27 %	5,95 %	5,97 %

Таким образом, именно обнаруженное явление многообразности динамической картины рассеяния породило возможность многопараметрической кристаллографии. Зависимости от условий дифракции вкладов диффузной составляющей и удельных вкладов дефектов каждого типа в картину рассеяния и их существенные отличия друг от друга создают основу для разработки принципов решения проблемы однозначной многопараметрической диагностики. В результате, применение методов диффузодинамической многопараметрической дифрактометрии позволяет однозначно восстанавливать параметры сложных дефектных структур.

1.5. Результаты многопараметрической диффузодинамической комбинированной дифрактометрии кристаллов с несколькими типами дефектов

В данном разделе приведены результаты проведенной с использованием установленного явления многообразности путем комбинирования высокоразрешающих рентгеновских дифракционных методов количественной диагностики сложных дефектных структур в кристаллах кремния, выращенных методом Чохральского (Cz Si). Концентрации и средние радиусы дислокационных петель и преципитатов кислорода определены с использованием комбинированной обработки карт обратного пространства (рис. 13 и 14) и кривых дифракционного отражения (рис. 15), основанной на аналитических формулах статистической динамической теории дифракции рентгеновских лучей неидеальными кристаллами со случайно распределенными дефектами нескольких типов (1)–(15). Результаты комбинированной диагностики представлены в табл. 2.

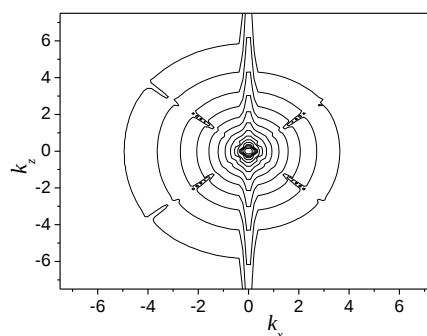
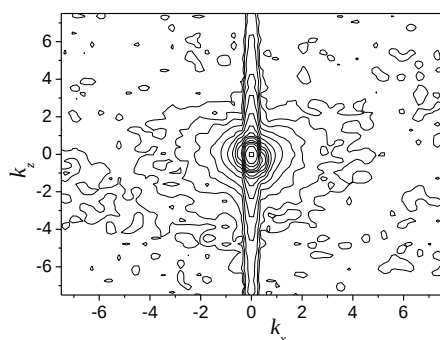


Рис. 13. Экспериментальная (слева) и рассчитанная (справа) карты обратного пространства образца Cz Si, геометрия Брэгга, рефлекс 333, $\text{CuK}\alpha_1$ излучение (k_x и k_z измеряются в $\text{glu} \times 10^{-4}$)

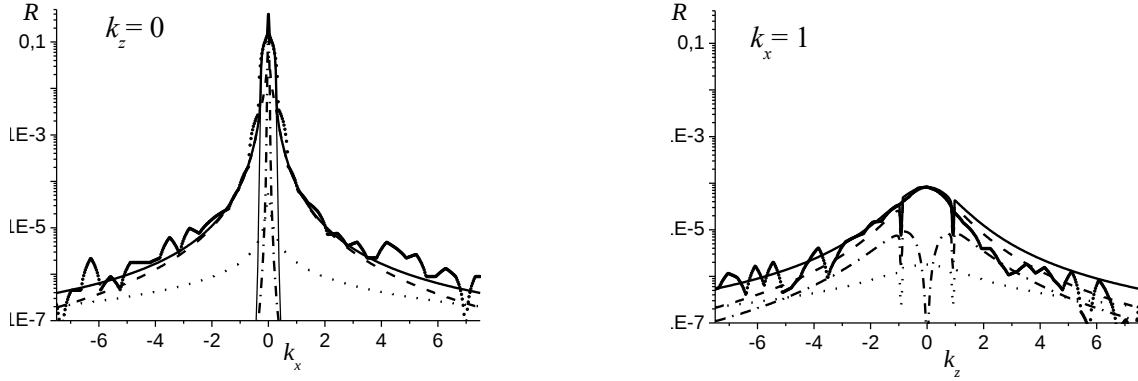


Рис. 14. Поперечное (слева) и продольное (справа) сечения карты обратного пространства, измеренной на ТОД (см. рис. 13). Измеренный и рассчитанный профили представлены соответственно маркерами и толстой сплошной линией, последний содержит когерентную компоненту и вклады в ДР от крупных и мелких дислокационных петель и сферических преципитатов кислорода (тонкая сплошная, штрих-пунктирная, пунктирная и штриховая линии, соответственно)

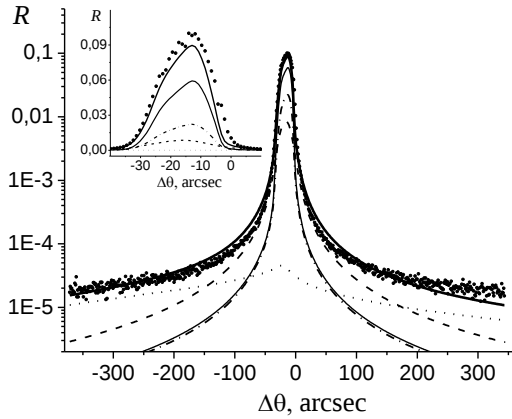


Рис. 15. Экспериментальные и теоретические кривые отражения (соответственно маркеры и толстые линии) для образца Cz Si, рефлекс 333, излучение $\text{CuK}\alpha_1$. Остальные линии такие же как на рис. 14. На вставках показаны центральные части КДО

Измерения на трехосевом дифрактометре (ТОД) в режиме ω -сканирования без кристалла анализатора дают дифференциальную отражательную способность исследуемого образца, проинтегрированную по сфере Эвальда, т.е. кривую дифракционного отражения (КДО). Диффузная компонента КДО в случае геометрии дифракции по Брэггу может быть записана в приближении полубесконечного кристалла как [82]:

$$R_{\text{diff}}(\Delta\theta) \approx F_{\text{dyn}}(\Delta\theta) \mu_{\text{HH}}(\Delta\theta) / (2\gamma_0 \mu_i). \quad (16)$$

Здесь фактор $F_{\text{dyn}} \sim 1$ описывает угловую модуляцию интенсивности диффузного рассеяния (ДР), вызванную динамической интерференцией сильных брэгговских волн. Интерференционный коэффициент поглощения μ_i описывает эффект экстинкции для диффузных волн и в области полного отражения может быть оценен как $\mu_i \sim \pi/\Lambda$, а вне ее как $\mu_i \approx (1+b)\mu_0/(2\gamma_0)$.

Дисперсионная поправка в следствии ДР μ_{HH} в выражении (16) является суммой коэффициентов поглощения из-за ДР для каждого дефекта типа α с i -ым размером $\mu_{\text{ds}}^{\alpha i}$:

$$\mu_{\text{HH}}(\Delta\theta) = \mu_{\text{ds}}(k_0) = \sum_{\alpha} \sum_i \mu_{\text{ds}}^{\alpha i}(k_0), \quad (17)$$

где $k_0 = K\Delta\theta \sin(2\theta_B)$, θ_B – угол Брэгга. Выражения (16) и (17) описывают вклады от дефектов нескольких типов в интенсивность ДР на измеряемых дифракционных профилях и поглощение когерентной компоненты рассеяния из-за ДР, соответственно (см. рис. 15).

Исследуемый образец кремния с ориентацией поверхности (111) и толщиной ($t \approx 4.26$ мм) был вырезан из слитка, выращенного методом Чохральского, с осью роста $\langle 111 \rangle$. Карты обратного пространства исследуемого образца были измерены на дифрактометре *PANalytical X'Pert Pro MRD XL* для симметричного Si (333) рефлекса характеристического $\text{CuK}\alpha_1$ излучения. Дополнительно, КДО были измерены для рефлекса Si (333) в режиме ω -сканирования на ТОД без использования кристалла анализатора.

При анализе измеренных дифракционных профилей и карт обратного пространства пренебрегалось вкладом теплового ДР как малой величиной в рассматриваемой области обратного пространства [82]. Влияние инструментальной функции учитывалось только при обработке КДО.

Приближенный учет инструментальных факторов при обработке карт обратного пространства и их сечений объясняет расхождения между теорией и экспериментом вдоль когерентного пика от образца, а также экстинкционные провалы на расчетных картах вдоль направлений в обратном пространстве, для которых выполняется условие Брэгга для волновых векторов падающей и дифрагированной диффузно рассеянных волн (см. рис. 13 и 14). С другой стороны, благодаря этому упрощению было достигнуто существенное уменьшение времени расчета.

Для определения качества подгонки КДО используются обычный R и взвешенный R_w факторы надежности:

$$R = \sum_j |R_j^{\text{calc}} - R_j^{\text{meas}}| / \sum_j R_j^{\text{meas}}, \quad j = 1, \overline{N},$$

$$R_w = (N + p)^{-1} \sum_j |R_j^{\text{calc}} - R_j^{\text{meas}}| / R_j^{\text{meas}}.$$

Здесь R_j^{meas} и R_j^{calc} – соответственно экспериментальные и теоретические значения интенсивности на КДО при угловом отклонении образца $\Delta\theta_j$, N и p – количество экспериментальных точек и число определяемых параметров. Факторы R и R_w используются для оценки качества подгонки соответственно в области полного отражения и во всем измеряемом угловом диапазоне.

Для проведения детальной количественной диагностики исследуемых кристаллов Cz Si необходимо выбрать подходящую модель дефектной структуры. Как правило, можно предположить одновременное присутствие двух типов случайно распределенных микродефектов (без корреляции в их расположении), а именно, преципитатов кислорода и междоузельных дислокационных петель [83].

Одной из основных проблем рентгеновской дифракционной диагностики подобных сложных дефектных структур, которые ожидаются в исследуемых образцах, является сложность в идентификации двух типов дефектов со схожими (кулоновского типа) асимптотическими полями статических смещений и, как следствие, схожими дифракционными картинками.

Еще в большей степени эта проблема проявляется когда распределение интенсивности ДР проинтегрировано по сфере Эвальда и, таким образом, индивидуальные особенности распределений от кластеров и дислокационных петель сглаживаются. Именно такой случай имеет место, когда КДО измеряются на ТОД без кристалла анализатора. В частности, в нашем рассмотрении имеется возможность промоделировать экспериментальные КДО практически с одинаково хорошим качеством, используя только преципитаты кислорода двух существенно различных радиусов или только дислокационных петель также двух радиусов.

По этой причине важна роль измеряемых карт обратного пространства, заключающаяся в однозначном установлении доминирующего типа микродефектов, дающих основной вклад в измеряемые дифференциальные распределения интенсивности ДР, и определении приближительных характеристик дефектов.

Действительно, как можно видеть из рис. 13, для образца Cz Si форма линий равной интенсивности на картах характерна для круговых дислокационных петель с ориентацией вектора Бюргерса $\langle 111 \rangle$ (сравн. с [56]). Их радиусы R_L оценены с использованием измеренных карт обратного пространства и их сечений (рис. 13 и 14) и равны приблизительно 0.1 мкм.

Следует подчеркнуть, что фитирование экспериментальных карт обратного пространства и их сечений выполнялось при взаимном согласовании с результатами подгонки КДО, т.е. проводилась комбинированная обработка карт и КДО. КДО, благодаря интегрированию интенсивности ДР по сфере Эвальда, имеют большую чувствительность к дефектам малых размеров по сравнению с картами, на которых их вклад практически незаметен.

Таблица 2

Характеристики дислокационных петель (радиус R_L и концентрация n_L) и преципитатов кислорода (R_p , n_p) образце Cz Si

Дислокационные петли		Преципитаты кислорода		R , %	R_w , %
R_L , мкм	n_L , см ⁻³	R_p , мкм	n_p , см ⁻³		
0.002	$1 \cdot 10^{16}$	1	$5 \cdot 10^6$	17	21
0.12	$7 \cdot 10^{11}$				

В частности, в рассмотренном случае малые дислокационные петли с радиусами в несколько нанометров дают существенный вклад на далеких хвостах КДО, в то время как на дифракционных профилях ТОД их вклад пренебрежимо мал (сравн. рис. 14 и 15). Поэтому следует еще раз подчеркнуть особенно важную роль совместной обработки карт и КДО для достоверного количественного определения характеристик микродефектов с широким разбросом их размеров.

Полученные в этом разделе результаты демонстрируют возможность количественной диагностики многопараметрической дефектной структуры в монокристаллах кремния при комбинированной обработке экспериментальных данных по высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии с использованием аналитических формул статистической динамической теории дифракции рентгеновских лучей в несовершенных кристаллах. При этом различные экспериментальные методы дифрактометрии могут рассматриваться как частный случай разных условий динамической дифракции, обеспечивающий многообразие картины рассеяния, и, соответственно, необходимый набор независимых экспериментальных данных.

2. ОСНОВЫ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИФФУЗНОДИНАМИЧЕСКОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ МНОГОСЛОЙНЫХ СИСТЕМ С НЕОДНОРОДНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ОТ СЛОЯ К СЛОЮ ДЕФЕКТАМИ

3.1. Теоретическая модель

Ниже приведены полученные авторами в [84, 85] аналитические выражения, описывающие динамическое рассеяние в многослойных системах при различных условиях дифракции. Для когерентной составляющей рассеяния в геометрии дифракции по Лауэ в случае прямого рассеяния для многослойной системы, состоящей из M слоев на подложке, выражения для коэффициентов отражения и прохождения имеют вид:

$$\begin{pmatrix} R_0 \\ T_0 \end{pmatrix} = \mathbf{P}_0 \mathbf{P}_1 \dots \mathbf{P}_{M-1} \begin{pmatrix} R_M \\ T_M \end{pmatrix}, \quad (18)$$

$$\begin{pmatrix} R_j \\ T_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{c_j^1 \exp(K\Delta_j^1 d_j) - c_j^2 \exp(K\Delta_j^2 d_j)}{c_j^2 - c_j^1} & r_j \\ -\frac{r_j}{c_j^1 c_j^2} & t_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{j+1} \\ T_{j+1} \end{pmatrix} = \mathbf{P}_j \begin{pmatrix} R_{j+1} \\ T_{j+1} \end{pmatrix}, \quad (19)$$

где R_M и T_M – соответствующие коэффициенты для одного верхнего слоя в вакууме, R_0 и T_0 – для всей системы из M слоев и подложки, R_j и T_j – для j -го слоя системы, r_j и t_j – соответственно коэффициенты отражения и прохождения для изолированного кристаллического j -го слоя в вакууме, определяющиеся по формулам:

$$r_j = c_j^1 c_j^2 \frac{c_j^1 \exp(-iK\Delta_j^1 d_j) - c_j^2 \exp(-iK\Delta_j^2 d_j)}{c_j^2 - c_j^1} \quad (20)$$

$$t_j = \frac{c_j^2 \exp(-iK\Delta_j^1 d_j) - c_j^1 \exp(-iK\Delta_j^2 d_j)}{c_j^2 - c_j^1}. \quad (21)$$

Здесь d_j – толщина j -го слоя, а величины c_j^δ и Δ_j^δ задаются соответственно следующими выражениями:

$$c_j^\delta = -\frac{2\gamma_0 \Delta_j^\delta + \chi_{0j} + \Delta\chi_{00j}}{CE\chi_{-Hj} + \Delta\chi_{0Hj}}, \quad (22)$$

$$\Delta_j^\delta = \frac{1}{2\gamma_0}(\chi_{0j} + \Delta\chi_{00j}) + \frac{\lambda}{2\Lambda_j}(y_j + (-1)^\delta \sqrt{y_j^2 + 1}), \quad (23)$$

где $y_j = \frac{\alpha_j - \alpha_{0j}}{\sigma_j} \sqrt{b}$, $\sigma_j^2 = (CE\chi_{-Hj} + \Delta\chi_{0Hj})(CE\chi_{Hj} + \Delta\chi_{H0j})$, $\alpha_j = -\Delta\theta \sin(2\theta_{Bj})$,

$$2\alpha_{0j} = \chi_{0j} + \Delta\chi_{HHj} + \frac{1}{b}(\chi_{0j} + \Delta\chi_{00j}), \quad (24)$$

Для диффузной компоненты дифференциального коэффициента отражения для j -го слоя многослойной системы:

$$R_j^D(k) = \frac{c_j(1-c_j)v_{cj}d_j}{\gamma_0|y'^2+1|} \left(\frac{C_j E_j K^2}{4\pi} \right) \frac{e^{-2\gamma_j^L}}{(c_j^1 - c_j^2)^2} \times \sum_{\delta\tau\lambda\sigma} (-1)^{\delta+\tau+\lambda+\sigma} \left(\frac{c_j^1 c_j^2}{c_j^\delta} T_{j+1} - R_{j+1} \right) \left(\frac{c_j^1 c_j^2}{c_j^\lambda} T_{j+1} - R_{j+1} \right)^* \\ \frac{c_j^\delta (c_j^\lambda)^* e^{-iK(\Delta_j^\delta - \Delta_j^{\lambda*})d_j} X_j^{\delta\tau} (X_j^{\lambda\sigma})^*}{(C_j E_j \chi_{-Hj} + \Delta\chi_{0Hj}^\delta)(C_j E_j \chi_{-Hj} + \Delta\chi_{0Hj}^{\lambda*})} \Pi_j^{\delta\tau\lambda\sigma} (H_j u_{q\delta\tau}^j) (H_j u_{q\lambda\sigma}^j)^* \quad (25)$$

где $\Delta_j' = \frac{1}{2\gamma_0}(\chi_0 + \Delta\chi_{00}^\delta) + \frac{\lambda}{2\Lambda_j}(y' + (-1)^\tau \sqrt{y'^2 + 1})$, $y' = \frac{(\tilde{\alpha}' - \alpha_0')}{\sigma'} \sqrt{b}$, $\Lambda_j' = \frac{\lambda\gamma_H \sqrt{b}}{\sigma'}$,

$$2\alpha_0' = \chi_0 + \Delta\chi_{HH}^\delta - b^{-1}(\chi_0 + \Delta\chi_{00}^\delta), \quad \sigma' = (CE\chi_{-H} + \Delta\chi_{0H}^\delta)(CE\chi_H + \Delta\chi_{H0}^\delta), \quad \tilde{\alpha}' = -\Delta\theta' \sin(2\theta_B),$$

$$X_j^{\delta\tau} = \frac{\chi_{Hj} c_j^{\tau(\tau)}}{c_j^\delta \zeta_j'} - \chi_{-Hj}, \quad \zeta_j' = \frac{C_j E_j \chi_{Hj} + \Delta\chi_{H0}^{\delta\tau}}{C_j E_j \chi_{-Hj} + \Delta\chi_{0Hj}^\delta}, \quad \gamma_j^L = \sum_{i=0}^{j-1} \frac{\mu_i d_i}{\gamma_{Gi}}, \quad \mu_i = \mu_{0i} + \mu_{ds}^i, \quad v_{cj} - \text{объем элементар-}$$

ной ячейки в j -ом кристаллическом слое, а множитель, учитывающий аномальное поглощение, имеет вид:

$$\Pi_j^{\delta\tau\lambda\sigma} = \frac{\exp[iKt_j(\Delta_j^\delta - \Delta_j^{\lambda*})] - \exp[iKt_j(\Delta_j^\tau - \Delta_j^{\sigma*})]}{iKt_j(\Delta_j^\tau - \Delta_j^\delta - \Delta_j^{\sigma*} + \Delta_j^{\lambda*})}. \quad (26)$$

Для всей системы:

$$R_D(\mathbf{k}) = \sum_{j=0}^M R_j^D(\mathbf{k}), \quad (27)$$

где $R_j^D(\mathbf{k})$ – диффузная компонента дифференциального коэффициента отражения для j -го слоя.

Для геометрии дифракции по Брэггу в случае прямого рассеяния рекуррентные соотношения между амплитудными коэффициентами отражения соседних слоев имеют вид:

$$R_j = \frac{r_j + R_{j-1}(t_j^2 e_j - r_j^2)}{1 - r_j R_{j-1}}, \quad (28)$$

$$\text{где } R_j = (\zeta_j b_j)^{-1/2} \frac{D_{Hj}}{D_{0j}}, \quad r_j = (\zeta_j b)^{-1/2} \frac{D_{Hj}}{D_{0j}} = (\zeta_j b)^{1/2} \frac{e^{iK\Delta_j^1 d_j} - e^{iK\Delta_j^2 d_j}}{c_j^2 e^{iK\Delta_j^1 d_j} - c_j^1 e^{iK\Delta_j^2 d_j}}, \quad t_j = \frac{D_{0j-1}}{D_{0j}} = \frac{c_j^2 - c_j^1}{c_j^2 e^{iK\Delta_j^1 d_j} - c_j^1 e^{iK\Delta_j^2 d_j}},$$

$\Delta_j^\delta = \frac{1}{2\gamma_0}(\chi_{0j} + \Delta\chi_{00j}) + \frac{\lambda}{2\Lambda_j}(y_j + (-1)^\delta \sqrt{y_j^2 - 1})$, D_{0j} и D_{Hj} – амплитуды прямых и дифрагированных волн в j -ом слое.

Диффузная компонента дифференциального коэффициента отражения для j -го слоя в этом случае имеет вид:

$$R_j^D(\mathbf{k}) = \frac{c_j(1-c_j)\nu_{c_j}d_j}{\gamma_0} \left(\frac{C_j E_j K^2}{4\pi} \right)^2 e^{-2\gamma_j^B} \sum_{\delta\tau\lambda\sigma} (-1)^{\tau+\sigma} \tilde{L}_j^\delta (\tilde{L}_j^\lambda)^* \times \\ \frac{e^{iK(\Delta_j^\delta - \Delta_j^{\lambda*})} z_{j-1} e^{iK(\Delta_j^{\sigma*} - \Delta_j^\tau) d_j}}{(B'_{1\delta} - B'_{2\delta})(B'_{1\delta'} - B'_{2\delta'})^*} \Pi_j^{\delta\tau\lambda\sigma} (H_j u_{q\delta\tau}^j) (H_j u_{q\lambda\sigma}^j)^* X_j^{\delta\tau} (X_j^{\lambda\sigma})^*, \quad (29)$$

$$\text{где } \tilde{L}_j^\delta = c_j^\delta \frac{c_j^1 c_j^2 T_j^{-1} - c_j^\delta R_{j-1} \exp[iKd_j \Delta_j^1 \Delta_j^2 / \Delta_j^\delta]}{c_j^1 c_j^2 \exp[iK\Delta_j^\delta d_j] - (c_j^\delta)^2 \exp[iKd_j \Delta_j^1 \Delta_j^2 / \Delta_j^\delta]}, \quad X_j^{\delta\tau} = \frac{c_j^{(\tau)}}{c_j^\delta} \chi_{Hj} - \zeta_j' \chi_{-Hj}, \quad \gamma_j^B = \sum_{i=j+1}^M \frac{\mu_i d_i}{|\gamma_{Gj}|},$$

$$\Delta_j^{\tau\sigma} = \frac{1}{2\gamma_0}(\chi_{0j} + \Delta\chi'_{00j}) + \frac{\lambda}{2\Lambda_j'}(y_j' + (-1)^\tau \sqrt{y_j'^2 - 1}), \text{ а множитель, учитывающий аномальное по-}$$

глощение, имеет вид:

$$\Pi_j^{\delta\tau\lambda\sigma} = \frac{\exp[iKd_j(\Delta_j^\tau - \Delta_j^\delta - \Delta_j^{\sigma*} + \Delta_j^{\lambda*})] - 1}{iKd_j(\Delta_j^\tau - \Delta_j^\delta - \Delta_j^{\sigma*} + \Delta_j^{\lambda*})}. \quad (30)$$

В соответствии с работой [85] ниже приведены аналогичные выражения для случая обратного рассеяния, когда луч падает не на верхний слой многослойной структуры, а на подложку, т.е. когда гетеросистема вместе с подложкой перевернута. В этом случае выражение для брэгговской составляющей интенсивности рассеяния в геометрии дифракции по Лауэ имеет вид:

$$\begin{pmatrix} R_j \\ T_j \end{pmatrix} = \mathbf{P}_j \mathbf{P}_{j-1} \dots \mathbf{P}_2 \mathbf{P}_1 \begin{pmatrix} R_0 \\ T_0 \end{pmatrix} \text{ или } \begin{pmatrix} R_M \\ T_M \end{pmatrix} = \mathbf{P}_M \dots \mathbf{P}_2 \mathbf{P}_1 \begin{pmatrix} R_0 \\ T_0 \end{pmatrix}, \quad (31)$$

где R_0 и T_0 – соответствующие коэффициенты для подложки в вакууме, R_M и T_M – для всей системы из M слоев и подложки, R_j и T_j – для системы из j слоев и подложки, а матрица рассеяния $\mathbf{P}_j$ имеет вид:

$$\mathbf{P}_j = \begin{pmatrix} -\frac{c_j^1 \exp(K\Delta_j^1 d_j) - c_j^2 \exp(K\Delta_j^2 d_j)}{c_j^2 - c_j^1} & r_j \\ -\frac{r_j}{c_j^1 c_j^2} & t_j \end{pmatrix}, (j = 1, 2, \dots, M). \quad (32)$$

Выражение для диффузной компоненты дифференциального коэффициента отражения для j -го слоя многослойной системы в случае обратного рассеяния приобретает вид:

$$R_j^D(k) = \frac{c_j(1-c_j) \nu_{c_j} t_j \left(\frac{C_j E_j K^2}{4\pi} \right) e^{-2\gamma_j^L}}{\gamma_0 |y'^2 + 1| \left(\frac{c_j^1 - c_j^2}{c_j^1} \right)^2} \times \sum_{\delta\tau\lambda\sigma} (-1)^{\delta+\tau+\lambda+\sigma} \left(\frac{c_j^1 c_j^2}{c_j^\delta} T_{j-1} - R_{j-1} \right) \left(\frac{c_j^1 c_j^2}{c_j^\lambda} T_{j-1} - R_{j-1} \right)^* \cdot \frac{c_j^\delta (c_j^\lambda)^* e^{-iK(\Delta_j^\delta - \Delta_j^{\lambda*}) z_j} X_j^{\delta\tau} (X_j^{\lambda\sigma})^*}{\left(C_j E_j \chi_{-H_j} + \Delta \chi_{0H_j}^\delta \right) \left(C_j E_j \chi_{-H_j} + \Delta \chi_{0H_j}^{\lambda*} \right)^*} \Pi_j^{\delta\tau\lambda\sigma} \left(H_j u_{q\delta\tau}^j \right) \left(H_j u_{q\lambda\sigma}^j \right)^* \quad (33)$$

где выражение для γ_j^L приобретает вид:

$$\gamma_j^L = \sum_{i=0}^{j-1} \frac{\mu_i d_i}{\gamma_{G_j}}. \quad (34)$$

Для случая рассеяния в геометрии дифракции по Брэггу при обратном рассеянии рекуррентные соотношения между амплитудными коэффициентами отражения соседних слоев представляются в виде:

$$R_j = \frac{r_j + R_{j+1}(t_j^2 e_j - r_j^2)}{1 - r_j R_{j+1}}. \quad (35)$$

Диффузная составляющая картины рассеяния определяется выражением, аналогичным (29) с заменой $\tilde{L}_j^\delta$ и γ_j^B на соответствующие выражения для случая обратного рассеяния при Брэгг-дифракции:

$$\tilde{L}_j^{\delta'} = c_j^\delta \frac{c_j^1 c_j^2 T_j^{-1} - c_j^\delta R_{j+1} \exp[iKd_j \Delta_j^1 \Delta_j^2 / \Delta_j^\delta]}{c_j^1 c_j^2 \exp[iK\Delta_j^\delta d_j] - (c_j^\delta)^2 \exp[iKd_j \Delta_j^1 \Delta_j^2 / \Delta_j^\delta]}, \quad (36)$$

$$\gamma_j^B = \sum_{i=0}^{j-1} \frac{\mu_i d_i}{|\gamma_{G_j}|}. \quad (37)$$

2.2. анализ и реализация принципиально новых функциональных возможностей неразрушающей диагностики многослойных систем с дефектами

Рассчитанные с использованием указанной выше модели кривые дифракционного отражения и их когерентная и диффузная составляющие для многослойной системы (рис. 16) представлены на рис. 17. А именно, в геометриях дифракции по Лауэ для случаев прямого рассеяния (рис. 17а) и обратного рассеяния (рис. 17б), а также в геометрии дифракции по Брэггу для случаев прямого рассеяния (рис. 17в) и обратного рассеяния (рис. 17г).

GaAs	10 нм
Al _{0.3} Ga _{0.7} As	120 нм
GaAs	150 нм
GaAsN	24 нм
КЯ In _x Ga _{1-x} AsN	7.4 нм
GaAsN	24 нм
GaAs	175 нм

$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	320 нм
GaAs	150 нм
Подложка GaAs	350 мкм

Рис. 16. Схема многослойной структуры с квантовой ямой (КЯ) InGaAsN

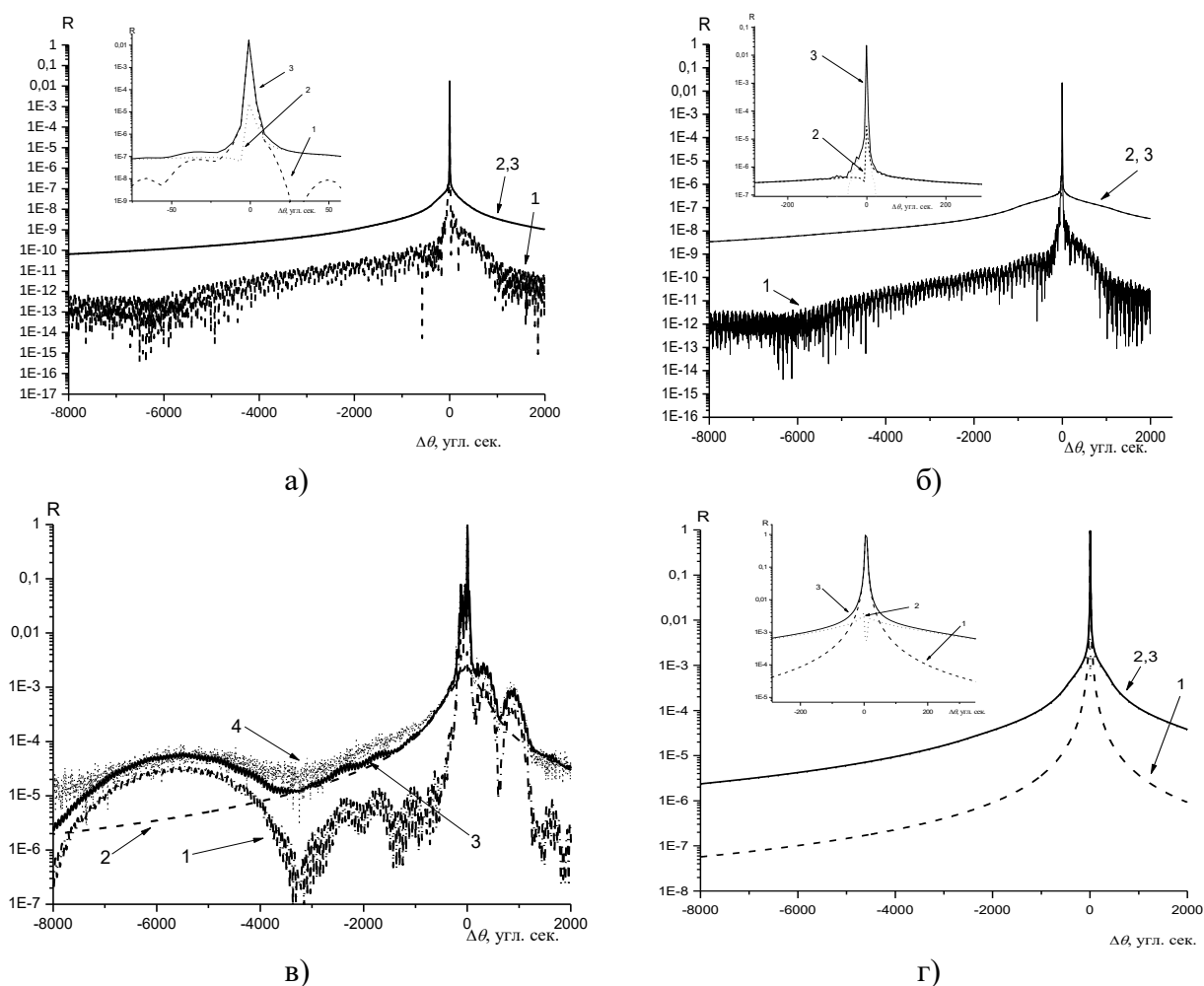


Рис. 17. Расчетные кривые дифракционного отражения для многослойной структуры с квантовой ямой InGaAsN (рефлекс 004) для геометрии дифракции по Лауэ в случае прямого рассеяния (а) и в случае обратного рассеяния (б) (излучение MoK α), а также для геометрии дифракции по Брэггу в случае прямого рассеяния (в) и в случае обратного рассеяния (г) (излучение CuK α). Нумерация 1, 2, 3 и 4 обозначает, соответственно, расчетные когерентную составляющую, диффузную составляющую, суммарную интенсивность рассеяния и экспериментальные данные [35]

Эти кривые демонстрируют существенную их зависимость от условий дифракции. При этом впервые установлены принципиальные отличия этих зависимостей для кривых отражения в целом и для их брэгговской и диффузной составляющих (всех трех кривых) между собой, что также демонстрируют формулы (16)–(35), в отличие от случая кинематического рассеяния, где это принципиально невозможно. Как будет показано ниже, этот эффект отличия имеет уникальную чувствительность к типу и характеристикам дефектов и играет фундаментальную роль в радикальном повышении чувствительности кривых отражения при переходе от кинематического к динамическому рассеянию, что и обосновывают построенные модели и

полученные на их основе результаты. В частности, формулы (16)–(35) позволили установить, что этот эффект обусловлен принципиальной разницей в проявлениях многократности рассеяния для брэгговской и диффузной составляющих.

Результаты анализа чувствительности динамических кривых отражения к дефектам разного типа и ее зависимости от условий дифракции представлены на рис. 18–20.

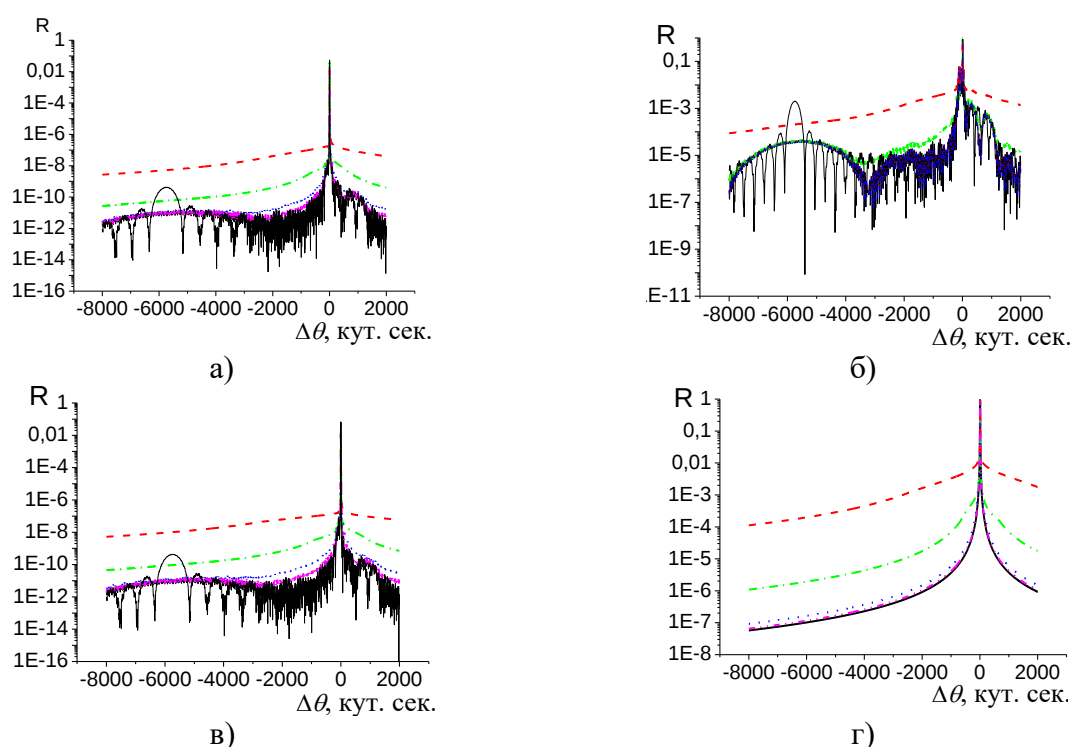
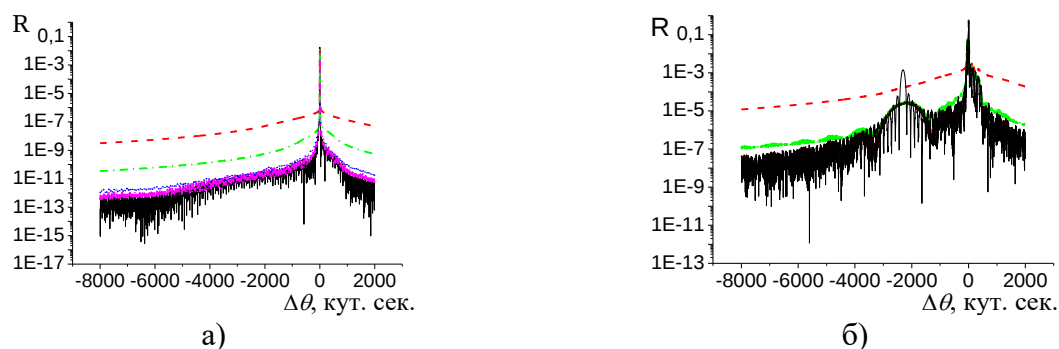


Рис. 18. Расчитанные кривые дифракционного отражения для многослойной структуры с квантовой ямой (рефлекс 004) для геометрии дифракции по Лауэ в случае прямого рассеяния (а) и в случае обратного рассеяния (б), а также для геометрии дифракции по Брэггу в случае прямого рассеяния (в) и в случае обратного рассеяния (г) (излучение $\text{CuK}\alpha$). Сплошная линия соответствует случаю идеального кристалла, штриховая – присутствию малых кластеров ($r_1 = 2 \text{ нм}$, $n_1 = 6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-1}$, $L_H = 0,02$), штрих-пунктирная – присутствию малых дислокационных петель ($r_2 = 2 \text{ нм}$, $n_2 = 7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-1}$, $L_H = 0,02$), пунктирная – крупных кластеров ($r_3 = 200 \text{ нм}$, $n_3 = 2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-1}$, $L_H = 0,02$) и штрих-пунктир-пунктир – присутствию крупных дислокационных петель ($r_4 = 200 \text{ нм}$, $n_4 = 7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-1}$, $L_H = 0,02$); тонкая сплошная линия соответствует случаю идеального кристалла с толщиной квантовой ямы, увеличенной в 8 раз



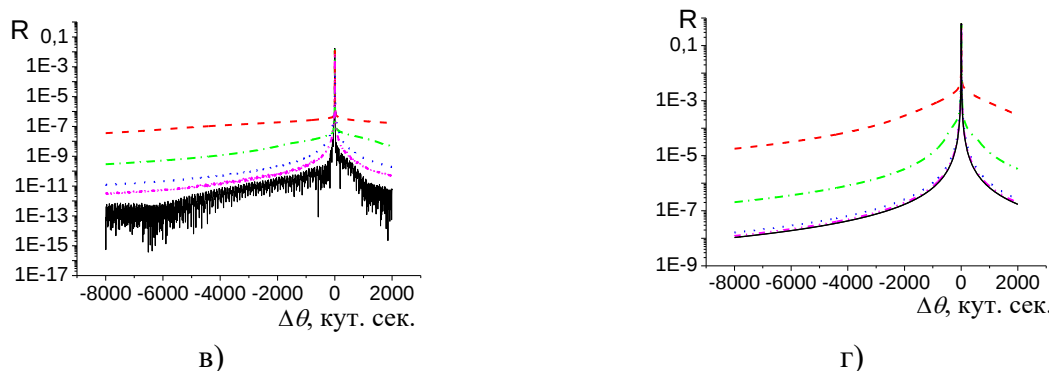


Рис. 19. То же, что на рис.18, но для излучения MoKα

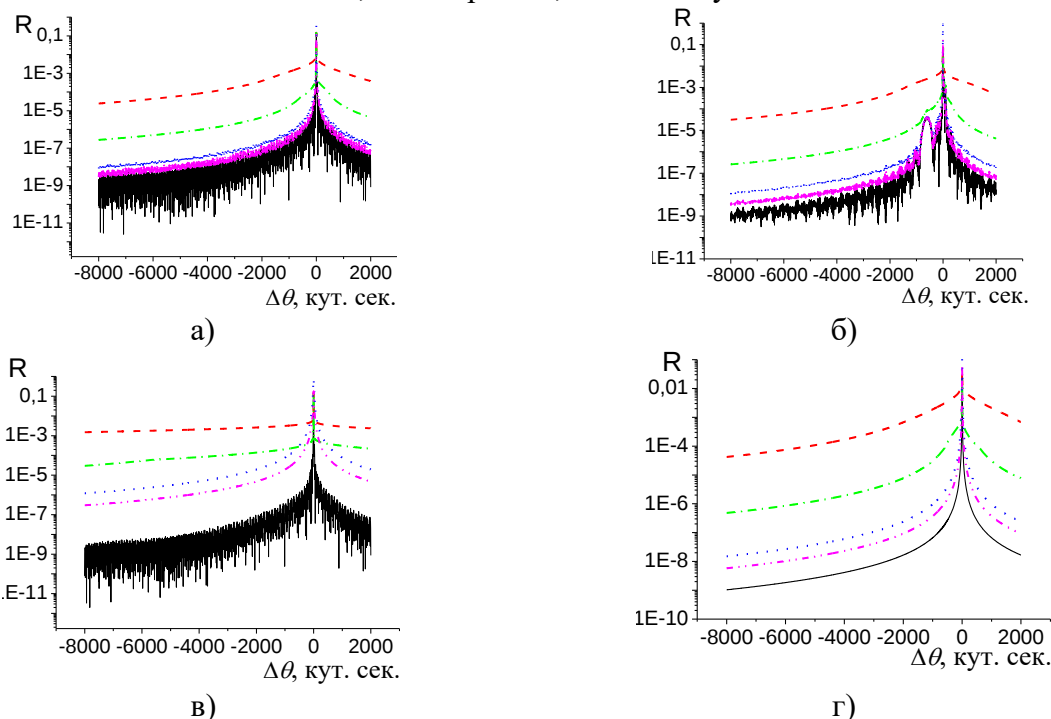


Рис. 20. То же, что на рис. 18, но для излучения WKα

Анализ кривых отражения, построенных на основе созданной модели и приведенных на рис. 18–20 позволил установить следующие новые эффекты в случае динамической дифракции в многослойных системах с дефектами. Доказано, что кривые отражения, а также характер влияния дефектов на вид кривых (их отличие от кривых отражения в случае отсутствия дефектов) зависят как от типа и характеристик дефектов, так и, в отличие от кинематического рассеяния, от условий дифракции. При этом указанные зависимости оказались существенно взаимосвязанными, т.е. изменения вида кривых отражения и характера влияния на них дефектов с изменением условий дифракции зависят от типа и характеристик дефектов, а изменения кривых отражения и характера влияния на них дефектов с изменением типа и характеристик дефектов зависит от условий дифракции. Установлено, что именно обнаруженная взаимосвязь зависимостей от характеристик дефектов и от условий дифракции кривых отражения и характера влияния на них дефектов обеспечивает радикальное повышение при переходе от кинематической к динамической дифракции чувствительности и информативности диагностики. При этом предложен новый подход в дифрактометрии, а именно диагностика не столько по характеру влияния на кривые отражения типа и характеристик дефектов, сколько по чувствительности к типу и характеристикам дефектов изменений этого влияния в зависимости от условий дифракции. То есть, обеспечено расширение функциональных возможностей диагностики на основе использования установленного эффекта чувствительности к типу и характеристикам дефектов не только характера влияния дефектов на кривые отражения, оказавшегося на порядки величины более сильным в сравнении со случаем кинематического

рассеяния, а также и зависимостей этой чувствительности от условий дифракции, что обеспечило уникальную возможность избирательного по отношению к типу дефектов управления этой чувствительностью в широких пределах путем целенаправленного изменения условий дифракции с целью решения проблемы однозначной многопараметрической диагностики.

Из анализа рис. 18–20 следует также возможность эффекта изменения избирательности чувствительности картины многократного рассеяния (кривой отражения) к дефектам разного типа в многослойных системах при вариациях условий динамической дифракции. Этот эффект существенно повышает информативность диагностики и может быть дополнительно использован для создания на основе построенной теоретической модели многопараметрической диффузодинамической комбинированной дифрактометрии многослойных систем.

Таким образом, рис. 18–20 наглядно демонстрируют обусловленное указанной выше взаимосвязью новое явление, которое наблюдается как зависимость от типа и характеристик дефектов многообразность кривых отражения при различных условиях динамической дифракции. Такая зависящая от характеристик дефектов и их типа многообразность обеспечивается изменением при переходе от одних условий дифракции к другим определяющих вид кривых отражения и их брэгговской и диффузной составляющих (рис. 17) механизмов многократности рассеяния и обеспечивающих указанную выше взаимосвязь зависимостей кривых отражения от условий дифракции и от характеристик дефектов. При этом следует отметить, что, как демонстрируют рисунки, изменение условий дифракции позволяет радикально (на порядки величины) усиливать влияние дефектов определенных типов на кривые отражения (на их отличия от кривых для случая отсутствия дефектов). При этом такое влияние дефектов других типов может в ряде случаев при определенных значениях их характеристик практически полностью нивелироваться. Это и обуславливает возможность и целесообразность комбинированного подхода, в котором обеспечивается уникально чувствительная и информативная диагностика с управляемыми функциональными возможностями. А именно, появляется возможность однозначно решать обратную задачу рассеяния при диагностике многопараметрических систем путем комбинированной обработки результатов целенаправленно выбранного набора необходимых измерений кривых отражения в различных условиях дифракции, который в целом обеспечивает достаточную чувствительность ко всем измеряемым (искомым) характеристикам структуры.

С целью обоснования физических принципов, обеспечивающих возможность однозначного решения обратной задачи рассеяния при диагностике многослойных наносистем, которые содержат одновременно дефекты нескольких типов рассмотрен случай приведенной выше многослойной наносистемы, в подложке которой одновременно присутствуют сферические кластеры двух размеров (см. таблицу 3) с радиусом 2 нм и концентрацией $7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а также с радиусом 6 нм и концентрацией $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. На рис. 21 представлены результаты диагностики характеристик дефектов указанных двух типов (при фиксированных параметрах кластеров меньшего размера) для этой системы на основе использования построенных теоретических моделей в четырех, рассмотренных выше, случаях условий динамической дифракции.

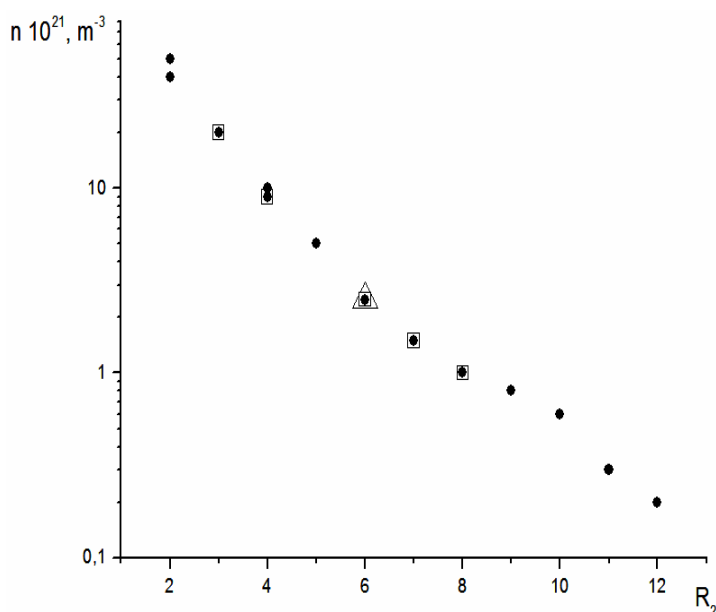


Рис. 21. Результаты диагностики характеристик дефектов подложки многослойной наносистемы. Круглые сплошные маркеры соответствуют наборам дефектов, удовлетворяющим кривую отражения для случая прямого рассеяния в геометрии дифракции по Брэггу, квадратные маркеры – наборам дефектов, удовлетворяющим одновременно кривые отражения как для случая прямого рассеяния в геометрии дифракции по Брэггу, так и по Лауэ, а треугольный маркер соответствует характеристикам того единственного набора дефектов, который удовлетворяет всем четырем кривым отражения

На первом этапе диагностика осуществлялась путем фитирования кривой отражения для случая прямого рассеяния в геометрии дифракции по Брэггу. При этом характеристики более мелких дефектов фиксировались ($R_1 = 2$ нм, $n_1 = 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$), а варьировались характеристики только дефектов второго типа. Результаты такого фитирования демонстрируются черными круглыми маркерами на рис. 21. Из этих результатов следует, что одной рассмотренной кривой отражения одновременно удовлетворяют несколько (все представленные сплошные круглые маркеры) различных наборов характеристик дефектов двух типов, что и демонстрирует неоднозначность такой диагностики. Однако если потребовать, чтобы эти характеристики удовлетворяли одновременно и кривой отражения для прямого рассеяния в случае геометрии дифракции по Лауэ, то из всех круглых маркеров такими (для которых характеристики дефектов удовлетворяют обеим кривым) останутся только пять, показанных на рис. 21 квадратными маркерами. И, наконец, всем четырем кривым отражения останутся удовлетворяющими характеристики только единственной пары дефектов, представленных треугольным маркером на рис. 21.

В результате показано, что только комбинированная обработка с использованием построенных теоретических моделей одновременно всех четырех кривых отражения, которые могут быть получены экспериментально в соответствующих четырех рассмотренных случаях динамической дифракции, может позволить решить проблему однозначной многопараметрической диагностики гетеросистем.

Результаты многопараметрической диагностики характеристик системы, представленной на рис. 16, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики многослойной структуры с дефектами

		Подложка GaAs	Слои GaAs	Слои $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	Слои $\text{GaAs}_{1-y}\text{N}_y$	QW $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$
Толщины слоев t , мкм		350	$150 \cdot 10^{-3}$ $175 \cdot 10^{-3}$ $150 \cdot 10^{-3}$ $10 \cdot 10^{-3}$	$320 \cdot 10^{-3}$ $120 \cdot 10^{-3}$	$24 \cdot 10^{-3}$ $24 \cdot 10^{-3}$	$7.4 \cdot 10^{-3}$
Химический состав слоев, x y		—	—	0.3	0.012	0.37 0.02
Сферические кластеры	Концентрация, см^{-3}	$2 \cdot 10^{15}$ $7 \cdot 10^{16}$	—	—	—	

	Радиус, нм	6 2	—	—	—	
--	------------	--------	---	---	---	--

2.3. результаты многопараметрической диагностики многослойных сверхрешеток с самоорганизованными решетками квантовых точек

Исследовались сверхрешеточные структуры с квантовыми точками $8 \cdot (11 \text{ ML (In, Ga)As} / 67 \text{ ML GaAs})$, выращенные на полуизолирующем арсениде галлия (100) на установке МВЕ. Измерения КДО для симметричных 400 и асимметричных 224 рефлексов проводились на двухкристальном спектрометре (кристалл-монокроматор GaAs(100), CuK_α -излучение, 400 отражение), а также дифрактометре фирмы «Philips MRD X-Pert».

Образец сканировался вблизи точного положения Брэгга в диапазоне около 3° в так называемом $\omega/2\theta$ -режиме. Регистрировались как ω -сканы (без анализатора), так и $\omega-2\theta$.

Основные экспериментальные спектры КДО для симметричного 400 отражения в режиме ω -сканирования (1) и $\omega-2\theta$ с анализатором (2) приведены на рис. 22.

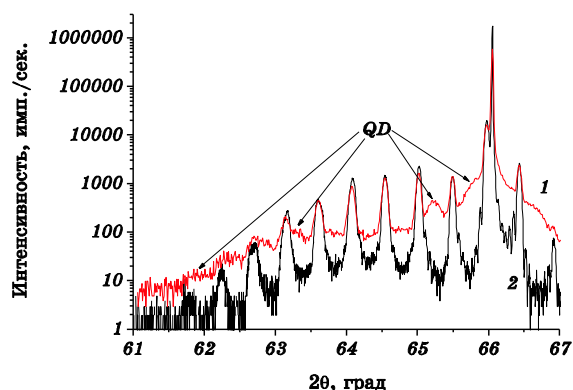


Рис. 22. Экспериментальные дифракционные спектры для 400 отражения: ω -сканирование (двухкристальный вариант) (1), $2\theta-\omega$ -сканирование (трехкристальный вариант) (2). QD – пики от квантовых точек

На спектрах наблюдается спутная структура пиков основной сверхрешетки (СР), а также вызванная наличием квантовых точек (КТ). Наблюдаемые на них особенности можно качественно объяснить просто. Видно, что кроме пика подложки и основного максимума, вызванного средней решеткой структуры (нулевого спутника), на хвостах КДО наблюдается сложная интерференционная структура, представляющая собой взаимодействие волн с одинаковыми периодами колебаний В идеальной решетке модулированы дифракционные пики за счет островков (КТ) и усредненной решетки слоев. Кроме спутников, отвечающих за период СР, на КДО наблюдается также система широких спутников, смещенных по углу относительно сверхрешеточных. При этом период их аналогичен периоду основной сверхрешетки. Эти спутники предположительно должны быть обусловлены самоорганизацией решеток квантовых точек. Особенно четко эти дополнительные спутники проявляются при ω -сканировании без анализатора.

Сравнение двух- и трехкристальных (с анализатором) кривых качания показывает, что пики, обозначенные на графике как (QD), действительно вызваны наличием решетки квантовых точек с примерно той же периодичностью. Анализируя сдвиг этой системы спутников относительно нулевого для основной СР, можно определить среднее напряжение в решетке КТ. Отсюда, используя уравнения Пуассона, получим средний состав КТ. Эти данные приведены в табл. 4.

Таблица 4

Состав и параметры СР с квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$
по данным рентгеновской дифрактометрии

Номер структуры	Состав	Средняя деформация в периоде СР, %	Толщина слоя GaAs, нм	Период СР, нм
1	0,2	4,5	18,91	$22,9 \pm 0,2$

2	0,25	5,5	15,87	17,8±0,3
---	------	-----	-------	----------

Рис. 22 также наглядно демонстрирует подавление сателлитной периодической структуры, вызванной островками в области больших отрицательных углов. Сбои высоты островков не гасят модуляцию, поскольку идеальный сверхпериод поддерживается решеткой смачивающих слоев. Небольшие сбои сверхпериода подавляют модуляцию пика средней решетки слоев, так как слои в этой модели составляют совершенную кристаллическую решетку, а решетка островков ближе к мозаичной структуре. В этом случае на фоне подавленных когерентных пиков хорошо виден пик, образованный диффузной компонентой от квантовых точек. По его полуширине была проведена оценка размеров КТ вдоль направления интерфейса (табл. 5).

Таблица 5

Параметры квантовых точек $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$
по данным рентгеновской дифрактометрии

Номер структуры	Средний состав КТ, %	Латеральные напряжения в КТ, %	Средний латеральный размер КТ, нм	Высота КТ, нм
1	58	0,0004	98	7,0
2	63	0,0003	86	7,8

Подтверждением вышесказанному являются двухмерные карты обратного пространства вокруг узлов 400 и 224.

На рис. 23 приведены карты, снятые в симметричном 400 (а) и асимметричном 224 (б) отражениях.

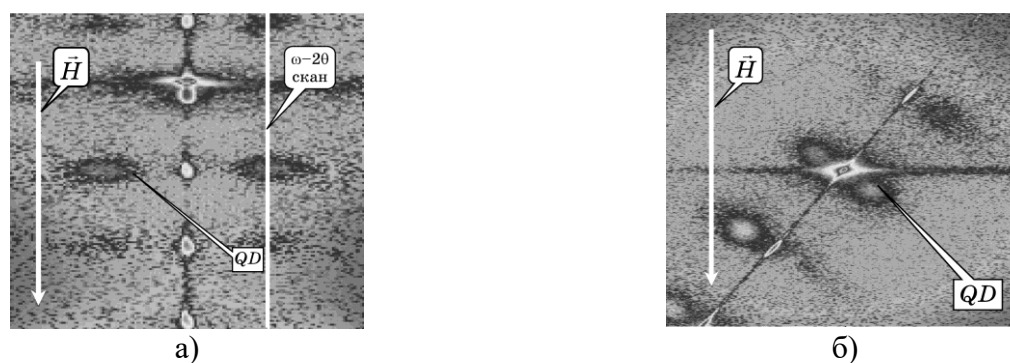


Рис. 23. Карты распределения дифрагируемой интенсивности в обратном пространстве вблизи узлов 400 (а) и 224 (б) для структуры InGaAs/GaAs. Излучение – $\text{CuK}_{\alpha 1}$.

$\vec{H}$ – вектор дифракции, QD – рассеяние от квантовых точек

Из рис. 23 следует, что дополнительные сателлиты на КДО 400 действительно соответствуют системе упорядоченных максимумов интенсивности. Причем это упорядочение наблюдается как в направлении роста q_z (вдоль вектора дифракции), так и в плоскости интерфейса (в направлениях $q_x(q_y)$). Период этих упорядоченных максимумов отличается в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Вдоль вектора дифракции он совпадает с периодом СР, и немного увеличивается в латеральном направлении. Само наличие упорядоченной системы максимумов уже свидетельствует о высоком качестве СР с квантовыми точками, наличие которых и подтверждается картиной рассеяния.

Таким образом, исследованы сверхрешеточные структуры с квантовыми точками, по данным рентгеновской дифрактометрии найдены параметры СР и средняя деформация в слое, а также параметры квантовых точек СР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам, полученным в разделе 2, можно сделать следующие выводы. Построена модель диффузодинамической дифрактометрии, комбинирующей четыре экспериментально реализуемых случая: геометрии дифракции как по Брэггу, так и по Лауэ, как для прямого, так и для обратного рассеяния для мягкого и жесткого рентгеновских излучений в многослойных системах с дефектами. Обнаружен эффект чувствительности к характеристикам дефектов зависимостей от условий дифракции динамической картины рассеяния или кривых отражения в многослойных системах с дефектами. Этот эффект проявляется в том, что в многослойных системах с неравномерно распределенными по слоям дефектами, как и в монокристаллах с однородно распределенными дефектами нескольких типов возникает при переходе от кинематического к динамическому рассеянию явление чувствительной к типу и характеристикам дефектов многообразности кривых отражения при изменении условий дифракции. При этом показано, что эффект радикального повышения при переходе от кинематической к динамической дифракции чувствительности к характеристикам дефектов и информативности диагностики обусловлен как повышением на порядки величины структурной чувствительности самих динамических картин рассеяния или кривых отражения, так и появлением принципиально только при многократном рассеянии такой структурной чувствительности, как оказалось, именно у зависимостей от условий дифракции этих картин рассеяния и, в частности, кривых отражения, что обеспечило качественное повышение информативности и впервые возможность решения задачи однозначной многопараметрической диагностики. В результате предложен и практически реализован новый подход и принципы

диффузодинамической комбинированной многопараметрической дифрактометрии многослойных систем с дефектами по характеру влияния дефектов как на сами динамические кривые отражения, так и на их зависимости от условий дифракции. При этом дополнительно информативность диагностики существенно повышена благодаря установленному в случае многослойных систем с дефектами эффекту изменения при вариациях условий динамической дифракции избирательности чувствительности кривых отражения к дефектам от одного к другому типу. Таким образом, созданы основы многопараметрической кристаллографии и впервые получены количественно без разрушения уникальные структурные характеристики для многослойных наносистем с дефектами нескольких типов.

3. СОЗДАНИЕ ОСНОВ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ГРАНАТОВЫХ СИСТЕМ $Y_3Fe_5O_{12}/Gd_3Ga_5O_{12}/Y_3Fe_5O_{12}$ СО СЛОЖНОЙ ЯЧЕЙКОЙ И НЕОДНОРОДНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ КАК ОТ СЛОЯ К СЛОЮ, ТАК И ВНУТРИ СЛОЕВ МАКРОДЕФОРМАЦИЯМИ РАЗНОЙ ПРИРОДЫ И МИКРОДЕФЕКТАМИ НЕСКОЛЬКИХ ТИПОВ

Созданные в предыдущих разделах работы теоретические модели обобщены в настоящем разделе на случай динамической дифрактометрии ионно-имплантированных пленочных систем со сложной ячейкой и неоднородно распределенными как от слоя к слою, так и внутри слоев макродеформациями разной природы и микродефектами нескольких типов. С помощью высокоразрешающего двухкристального дифрактометра проведены измерения КДО от монокристаллических пленок железо-иттриевого граната $Y_3Fe_5O_{12}$ на подложке гадолиний-галлиевого граната $Gd_3Ga_5O_{12}$, которые были имплантированы разными дозами ионов F^+ с энергией 90 кэВ и ионов Si^+ с той же энергией. Обработка измеренных КДО с использованием обобщенной теоретической модели позволила установить параметры профиля деформации и характеристики структурных дефектов как в имплантированных слоях, так и в основном объеме пленок и подложек исследованных образцов.

3.1. Вступление

Эпитаксиальные монокристаллические пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) $Y_3Fe_5O_{12}$ на подложке гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) $Gd_3Ga_5O_{12}$ широко используются в различных областях науки и техники [86–99]. Большое количество современных фундаментальных научных исследований физических свойств пленок ЖИГ (см., напр., [90–99]) и широкий спектр их практических применений [86–89, 100–103] обуславливаются богатством и зачастую уникальностью физических, в частности, магнитных, оптических и магнитооптических свойств кристаллов гранатов. В частности, пленки ЖИГ используются в сенсорных устройствах визуальной магнитометрии для контроля пространственного распределения неоднородных магнитных полей, в устройствах энергонезависимой магнитной памяти, в изделиях магнитной микроэлектроники и интегральной магнитооптики.

Эксплуатационные характеристики таких устройств определяются физическими свойствами поверхностного слоя пленки толщиной до одного микрометра. Одним из главных методов целенаправленной модификации поверхностных слоев монокристаллов является ионная имплантация [104–108]. Применение метода ионной имплантации открывает возможности создания в пленках ЖИГ локальных областей с заданными физическими свойствами. Преимущества этого метода заключаются в возможности вводить в нужном количестве дополнительные атомы в рабочий слой, в отсутствии границ химической растворимости имплантированных химических элементов в материале матрицы, и в возможности управления профилем распределения имплан-

тированных ионов и вызванной ими деформацией по глубине слоя. Однако, несмотря на наличие накопленного экспериментального и теоретического материала [104–108], остается открытым ряд вопросов, в частности, относительно хода процессов образования первичных и вторичных дефектов в пленках ЖИГ после ионной имплантации, а также влияния режимов имплантации на параметры магнитной и кристаллической микроструктур пленок ЖИГ.

Как известно, для количественного определения параметров структурных деформаций и характеристик структурных дефектов в модифицированных поверхностных слоях кристаллов наиболее широко используют неразрушающие рентгеновские дифракционные методы диагностики, которые, в частности, основываются на измерении кривых дифракционного отражения (КДО) кристаллов в брэгговской геометрии дифракции [109–112]. Эффективность применения дифракционных методов в значительной мере определяется наличием аналитических выражений, которые дают адекватное описание измеряемых КДО.

Для анализа дифракционных картин и, в частности, КДО, которые измеряются от кристаллических структур с неоднородной деформацией, применяются различные теоретические модели. В первую очередь следует отметить те из них, которые относятся к деформированным монокристаллическим или бездефектным многослойным структурам. Они основаны на простых аналитических выражениях кинематической теории [113, 114] или аналитических решениях динамических уравнений Такаги – Топена в полукинематическом приближении [115–122]. Широко используются рекуррентные соотношения между аналитическими решениями динамической теории для отдельных слоев с постоянной деформацией в каждом слое, полученные как на основе уравнений Такаги – Топена, так и в рамках подхода Эвальда–Бете–Лауэ [123–132]. Существуют также попытки аналитического решения обратной задачи рассеяния с целью установления вида произвольного профиля деформации в кристалле с использованием измеренных КДО [133–135]. Важно отметить, что все перечисленные подходы пренебрегают эффектами ДР от дефектов кристаллической структуры, которые могут существенно влиять на результаты диагностики.

Другая группа теоретических моделей, которая относится к дифракции в кристаллических структурах с неоднородной деформацией и учитывает наличие в них хаотически распределенных дефектов, тоже использует подходы как кинематической, так и динамической теорий дифракции [136–144]. Эти модели, основанные непосредственно на уравнениях Такаги или на более поздней динамической модели, которая использует статистическую динамическую теорию Като [81, 145], модифицированную В.А. Бушуевым [146, 147], для описания угловых распределений интенсивности дифракции, имеют общий существенный недостаток. Он заключается в том, что все указанные модели принципиально двумерные, т.е. процессы рассеяния рассматриваются в них исключительно в плоскости дифракции, вследствие чего они непригодны для корректного описания процессов ДР, которые всегда проходят с передачей импульса в трех измерениях.

Этого недостатка лишена теоретическая модель, которая использует статистическую динамическую теорию дифракции в несовершенных кристаллах со случайно распределенными дефектами и основывается на подходе Эвальда – Бете – Лауэ [30, 31]. Эта модель позволяет адекватным образом описывать ослабление когерентных волн вследствие ДР на дефектах. Последнее при фиксированной ориентации начальной падающей волны интегрируется по области Эвальда, т.е., по углу выхода диффузно рассеянных волн в плоскости дифракции и по их вертикальной расходимости (по углу отклонения от плоскости дифракции) [61, 82, 148]. В случае измерений КДО на двухкристальном дифрактометре (ДКД) с широко открытым окном детектора аналогично интегрируется и сама интенсивность ДР, что обеспечивает, в частности, полную согласованность соответствующих аналитических выражений с известными феноменологическими выражениями для интенсивности ДР в приближениях как тонкого, так и толстого кристаллов.

Цель данного раздела (3) работы состоит в дальнейшем развитии теоретической модели динамической дифракции рентгеновских лучей в многослойных кристаллических системах со случайно распределенными дефектами (см. раздел 3 и работы [38, 149–155]) для случая систем со сложной ячейкой и неоднородными деформациями разной природы, которые могут быть вызваны ионной имплантацией или несогласованностью постоянных кристаллических решеток в соседних слоях. Дополнительной целью является практическая реализация диагностических возможностей этой модели на примере монокристаллических пленок ЖИГ $Y_3Fe_5O_{12}$ на подложке ГТГ $Gd_3Ga_5O_{12}$, которые были имплантированы различными дозами ионов F^+ с энергией 90 кэВ и ионов Si^+ с такой же энергией.

3.2. Эксперимент

Пленки ЖИГ с толщиной 5,33 мкм были выращены методом Чохральского в промышленных условиях по стандартной технологии жидкостно-фазовой эпитаксии на обеих сторонах диэлектрической немагнитной подложки ГТГ с осью роста [111] и толщиной около 500 мкм. Выращивание проводилось в пятизонной печи для жидкостно-фазовой эпитаксии Garnet-3 (НПП «Карат», г. Львов). Подложка ГТГ в горизонтальном положении погружалась в раствор-расплав с составом $Y_2O_3-Fe_2O_3-PbO-B_2O_3$ с последующим вращением и вытягиванием. Концентрация компонент и температура выбирались такими, чтобы в процессе роста единой термодинамически стабильной фазой был ЖИГ. Стехиометрия пленок соответствует формуле $Y_{2,9909}Pb_{0,0093}Fe_5O_{12}$ при чувствительности методики по Pb примерно $5 \cdot 10^{-5}$ ат. %. Исследуемые пленки ориентированы в плоскости (111), угол розориентации не превышал 7 угл. мин. Обработка образцов после выращивания состояла из механической шлифовки, механической, химико-механической и химической полировки. Для снятия переходного слоя «пленка–воздух» поверхность пленки обрабатывали смесью азотной и уксусной кислот и щелочно-фосфатным раствором (KOH, N_3PO_4 , Na_2CO_3) с последующей промывкой деионизированной водой. Поверхность соответствовала 14 классу чистоты.

Исследуемые образцы ЖИГ/ГТГ были имплантированы ионами F^+ с энергией 90 кэВ и ионами Si^+ с той же энергией, дозы облучения составляли $D = 1 \times 10^{13}$, 6×10^{13} , 2×10^{14} см⁻². Имплантация осуществлялась при таких условиях ориентации образцов, которые обеспечивали отсутствие каналирования ионов.

Измерение КДО исследуемых образцов для отражений (444) и (888) в условиях симметричной геометрии дифракции по Брэггу (см. рис. 24–26) были проведены с использованием высокоразрешающего рентгеновского дифрактометра с широко открытым окном детектора. Использовалось характеристическое излучение $CuK_{\alpha 1}$ рентгеновской трубки типа БСВ-29, которая имела мощность 0,625 кВт (25кВ×25мА). Исследуемые образцы находились в параллельном (бездисперсионном) расположении относительно последнего отражения монокроматора, который состоял из двух плоских кристаллов Ge в антипараллельном (дисперсионном) расположении с симметричным отражением (333) на каждом из них.

Кристаллическая система «пленка ЖИГ на подложке ГТГ» со структурной точки зрения характеризуется наличием ростовых дефектов в объемах пленки и подложки, а также неоднородных деформаций в поверхностном и переходном (между пленкой и подложкой) слоях. Ионная имплантация этой системы приводит к появлению первичных и вторичных радиационных дефектов, создающих в поверхностном слое дополнительную деформацию, имеющую постоянную (с неоднородным профилем) и флуктуационную составляющие, первая из которых в определенной степени коррелирует с профилем энергетических потерь имплантированных ионов. На рис. 24–26 представлены измеренные и рассчитанные КДО для рефлексов (444) и (888) пленочной системы ЖИГ/ГТГ, имплантированной ионами F^+ с энергией $E = 90$ кэВ и дозой $D = 1 \times 10^{13}$ см⁻² (излучение $CuK_{\alpha 1}$). Следует отметить, что для аналитического описания дифракции рентгеновских лучей в такой системе можно представить ее как многослойную кристаллическую систему с постоянной средней деформацией в каждом из слоев и

воспользоваться рекуррентными соотношениями между когерентными компонентами амплитудных коэффициентов отражения соседних слоев [155], которые получены в рамках динамической теории рассеяния в несовершенных монокристаллах с хаотически распределенными дефектами [82, 149, 151] (см. также раздел 2 настоящей работы).

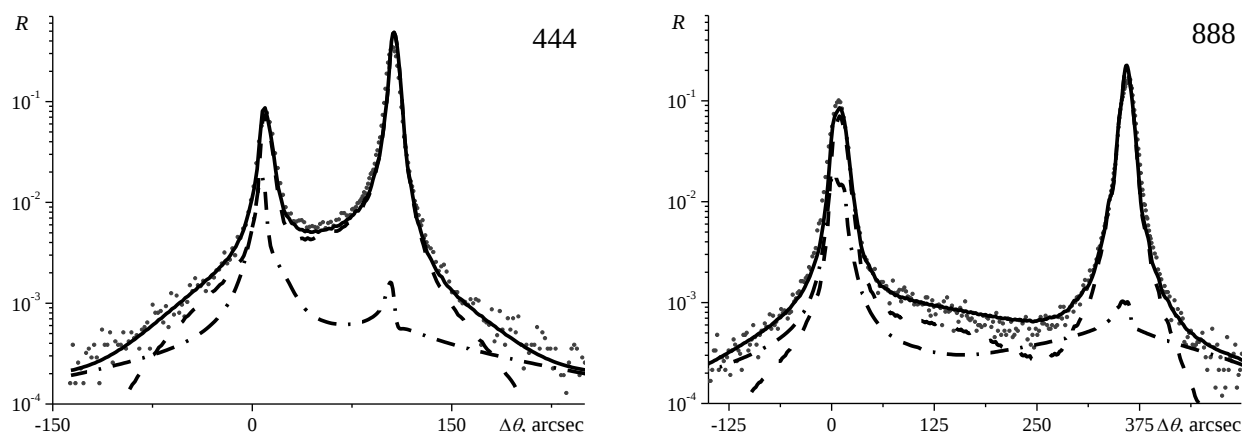


Рис. 24. Измеренные и рассчитанные КДО (соответственно маркеры и сплошные линии) для рефлексов (444) и (888) пленочной системы ЖИГ/ГГГ, имплантированной ионами F^+ с энергией $E = 90$ кэВ и дозой $D = 1 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (излучение $\text{CuK}\alpha_1$). Штриховые и штрих-пунктирные линии описывают соответственно когерентную и диффузную компоненты теоретической КДО

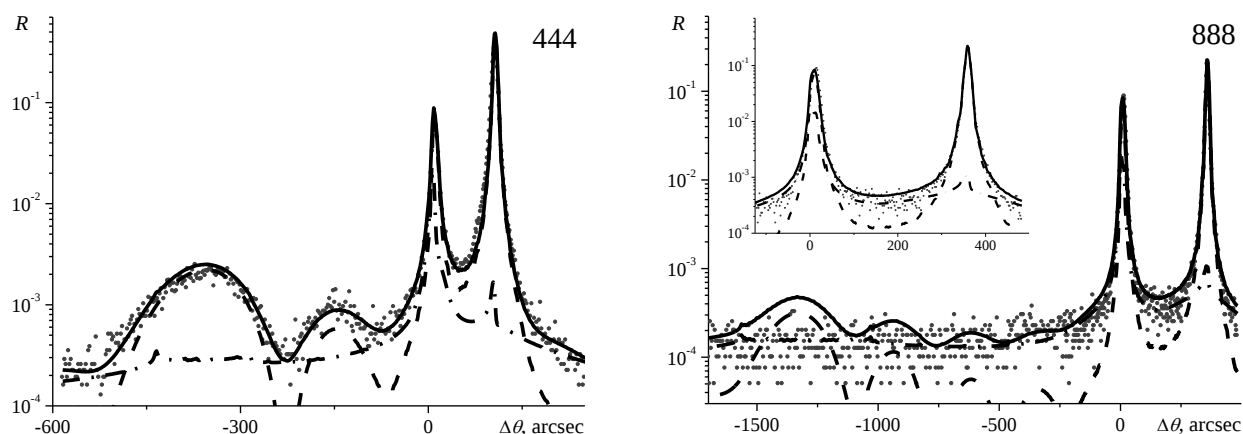


Рис. 25. См. подпись к рис. 24, $D = 6 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$

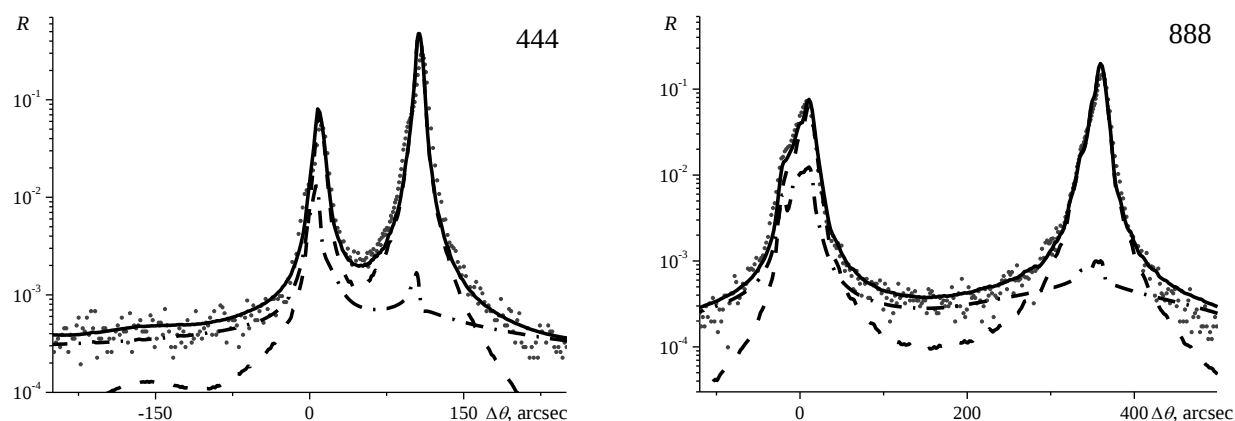


Рис. 26. См. подпись к рис. 24, $D = 2 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$

3.3. Анализ результатов измерений

3.3.1. Модель дефектной структуры

Для проведения количественной диагностики дефектной структуры монокристаллической многослойной системы с помощью дифракционных методов необходимо опираться на адекватную модель этой структуры. В кристаллах гранатов всегда присутствуют разнообразные точечные дефекты, а также ростовые микродефекты в виде включений, частиц новой фазы, пор и дислокационных петель (см., напр., [100, 101, 156] и обзоры в [153–155]). В монокристаллических гранатовых пленках, наряду с флуктуационными деформациями, которые создаются случайно распределенными дефектами, дополнительно возникают плавные неоднородные по глубине макроскопические деформации в переходных слоях на границах между поверхностью пленки и воздухом и между пленкой и подложкой за счет несоответствия постоянных решеток [155].

Благодаря ионной имплантации поверхностный слой пленки дополнительно насыщается первичными и вторичными радиационными дефектами, которые распределены неоднородно по глубине и вызывают соответствующую «в среднем» неоднородную деформацию. Известно, что толщина нарушенного слоя, вид профилей деформации и аморфизации кристаллической структуры определяются энергией, типом и дозой имплантированных ионов [104–106]. Легкие ионы создают отдельные изолированные объединения дефектов, которые состоят из сравнительно небольшого количества смещенных атомов и расположены на расстоянии нескольких межатомных расстояний вдоль трека имплантированного иона. Кластерные дефекты, возникающие при бомбардировке феррит-гранатовых пленок легкими ионами, сравнительно устойчивы и трудно поддаются термическому отжигу [157–160]. Увеличение дозы имплантации вызывает слияние отдельных дефектных зон и образование разупорядоченного слоя, который называют аморфным.

Учитывая описанные выше обстоятельства модель дефектной структуры имплантированной эпитаксиальной монокристаллической пленочной системы ЖИГ $Y_3Fe_5O_{12}$ на подложке ГГГ $Gd_3Ga_5O_{12}$, которая использовалась при анализе измеренных КДО, предполагала наличие как в подложке, так и в пленке ростовых микродефектов двух типов, а именно, сферических кластеров и круговых призматических дислокационных петель. Также учитывались наличие в них точечных дефектов (антиструктурных дефектов и анионных вакансий) и влияние теплового ДР. Для возможности аналитического описания влияния на дифракцию плавных неоднородных деформаций во всей системе, в частности, в переходных слоях между пленкой и подложкой и в имплантированном слое, пленочная система была упрощенно представлена в виде многослойной системы, в каждом слое которой деформация имела усредненную постоянную и флуктуационную составляющие.

При рассмотрении деформации в пленке, расчет нормальной ($\perp$) и тангенциальной ($\parallel$) компонент деформации несоответствия в пленке осуществлялся по выражениям:

$$\varepsilon_{\perp}^f = \frac{a_{\perp}^f - a_0}{a_0}, \quad \varepsilon_{\parallel}^f = \frac{a_{\parallel}^f - a_0}{a_0}, \quad (35)$$

где a_0 и a_f – параметры решетки соответственно в подложке и пленке. Нормальная компонента постоянной решетки в пленке $a_{\perp}^f$ в выражении (51) вычислялась следующим образом:

$$a_{\perp}^f = \frac{C_{11}^f + 2C_{12}^f}{C_{11}^f} (a_0^f - a_0) + a_0, \quad (36)$$

где C_{11}^f и C_{12}^f – упругие константы пленки.

Следует подчеркнуть, что деформация несоответствия в каждом из слоев имплантированной структуры, кроме очевидной составляющей, обусловленной различным химическим составом пленки и подложки, имеет дополнительный вклад. Он вызван имеющимися в них микродефектами (кластерами и/или дислокационными петлями), а также точечными дефектами, которые имеют различную по глубине концентрацию. Компоненты этой дополнительной деформации вычисляются для дислокационных петель и сферических кластеров следующим образом [161]

$$\varepsilon_L = \frac{\pi}{3} |\mathbf{b}| R_L^2 n_L, \quad \varepsilon_C = \Gamma \varepsilon R_C^3 n_C, \quad (37)$$

где $\mathbf{b}$ – вектор Бюргерса петли, R_L и n_L – радиус и концентрация петель, $\Gamma = 1/3(1+\nu)/(1-\nu)$, ε – деформация на границе между кластером и матрицей, ν – коэффициент Пуассона, R_C и n_C – радиус и концентрация кластеров. Для точечных дефектов в соответствии с кристаллохимическими расчетами изменение постоянной кубической решетки редкоземельных гранатов, в частности, ЖИГ и ГТГ, и соответствующую деформацию можно вычислять по эмпирическому аналитическому выражению, связывающим эту постоянную с концентрациями дефектов и эффективными радиусами катионов (см. [153]).

При расчете теоретических КДО профили нормальной к поверхности кристалла деформации в нарушенном имплантацией слое вычислялись через профили концентрации кластеров, которые образуются смещенными атомами матрицы вследствие энергетических потерь имплантированных ионов [38, 149–152, 162–164]. При этом в модели учитывалось наличие двух каналов энергетических потерь для легких имплантированных ионов, а именно, посредством возбуждения электронной подсистемы и посредством упругих ядерных столкновений [158–160]. Это достигалось путем использования двух профилей концентрации образованных вторичных радиационных – сферических кластеров. Для электронного канала этот профиль задавался в виде нисходящего хвоста гауссианы ($t_0^{\text{el}} \leq 0, z \geq 0$):

$$n_C^{\text{el}}(z) = n_C^{\text{el,max}} f_{\text{el}}(z), \quad f_{\text{el}}(z) = \exp\left[-(z - t_0^{\text{el}})^2 / \sigma_{\text{el}}^2\right], \quad (38)$$

а для ядерного канала – в виде асимметричной гауссианы ($t_0^{\text{nucl}} > 0, z \geq 0$):

$$n_C^{\text{nucl}}(z) = n_C^{\text{nucl,max}} f_{\text{nucl}}(z), \quad f_{\text{nucl}}(z) = \exp\left[-(z - t_0^{\text{nucl}})^2 / \sigma_{\text{nucl}}^2\right], \quad (39)$$

$$\sigma_{\text{nucl}} = \begin{cases} \sigma_1, & z \leq t_0^{\text{nucl}}, \\ \sigma_2, & z \geq t_0^{\text{nucl}}. \end{cases}$$

При этом характеристики кластеров (величина деформации на границе кластера с кристаллической матрицей и радиусы, и соответствующие им мощности кластеров) для обоих каналов считались одинаковыми. Результирующий профиль нормальной деформации в имплантированном слое определяется суммой деформаций, созданных двумя распределениями концентраций кластеров:

$$\varepsilon_{\perp}(z) = \varepsilon_{\perp}^{\text{el}}(z) + \varepsilon_{\perp}^{\text{nucl}}(z), \quad (40)$$

где составляющие усредненной деформации от случайно распределенных кластеров на глубине z вычисляются с помощью второй формулы в (37) и выражений (38), (39).

Профиль так называемого фактора аморфизации в предлагаемом подходе описывается исключительно статическим фактором Кривоглаза – Дебая – Валлера $E = \exp(-L_H)$. Его показатель тоже выражается через характеристики микродефектов в имплантированном слое, в частности, в данном случае через радиус и профиль концентрации сферических кластеров по приближительной аналитической формуле [153]

$$L_H \cong \begin{cases} c_C n_0 \eta^{(4-p)/2} / (2-p), & 0 \leq p \leq 1, \\ c_C n_0 \eta^{3/2}, & p \geq 1, \end{cases} \quad (41)$$

где $p = \eta^2 / 100$, $n_0 = 4\pi R_C^3 / (3v_c)$ – количество элементарных ячеек, замещающихся объемом кластера, $\eta = \alpha_0 n_0^{1/3} N a_0 / (2\pi)$, $\alpha_0 = \Gamma \varepsilon (6\pi^2 / v_0)^{1/3} / 3$, ε – объемная деформация, создаваемая кластером, v_0 – количество атомов в элементарной ячейке.

Следует также обратить внимание на то, что в рамках предложенной дифракционной модели на ослабление когерентной компоненты интенсивности дифракции имплантированным слоем влияет не только статический фактор Кривоглаза-Дебая-Валлера (или «фактор аморфизации» [162–164]), но и коэффициент поглощения вследствие ДР. Этот коэффициент вычисляется через те же характеристики дефектов и профиль деформации и показатель статического фактора Кривоглаза – Дебая – Валлера [153, 155]. Еще один важный аспект модели заключается в том, что интенсивность ДР имплантированным слоем тоже выражается через коэффициент поглощения вследствие ДР.

Таким образом, выбранная модель дефектной структуры имплантированной пленки ЖИГ на подложке ГГГ позволяет минимизировать количество подгоночных параметров и обеспечивает физически понятную связь между характеристиками дефектов и структурно чувствительными дифракционными параметрами и соответствующими дифракционными картинками. Следует обратить особое внимание на самосогласованный характер вычисления всех структурно чувствительных дифракционных параметров, что дополнительно усиливает самосогласованный характер описания когерентной и диффузной компонент интенсивности дифракции.

3.3.2. Статистическая обработка измеренных КДО и обсуждение

При статистической обработке измеренных КДО в качестве параметров надежности подгонки использовались обычный (R) и взвешенный (R_w) факторы:

$$R = \sum_j |R_j^{\text{calc}} - R_j^{\text{meas}}| / \sum_j R_j^{\text{meas}}, \quad R_w = (N - p)^{-1} \sum_j |R_j^{\text{calc}} - R_j^{\text{meas}}| / R_j^{\text{meas}}, \quad (42)$$

где $j = \overline{1, N}$, N – количество измеренных точек КДО, R_j^{calc} и R_j^{meas} – соответственно рассчитанное и измеренное значения ординаты КДО в точке $\Delta\theta_j$, p – количество параметров подгонки. Первый из этих R -факторов отражает качество подгонки в центральной части КДО, а второй дает равномерную оценку качества подгонки во всем угловом диапазоне измеренной КДО. Теоретические значения R_j^{calc} находились с учетом свертки коэффициента отражения исследуемого образца с инструментальной функцией ДКД [61, 82, 148].

В первую очередь при анализе измеренных КДО пленки ЖИГ на подложке ГГГ обращает на себя внимание то обстоятельство, что изменения в их форме, вызванные деформацией кристаллической решетки в имплантированном слое при малой дозе имплантации, частично наблюдаются в той угловой области, где находится пик от подложки (рис. 24). Такое наложение затрудняет анализ деформации в этом слое. Поэтому здесь следует еще раз подчеркнуть необходимость самосогласованного описания взаимодействия сложных интерференционных и экстинкционных эффектов в неоднородных кристаллических системах для объяснения наблюдаемых дифракционных картин.

Поскольку в подложке и пленке всегда присутствуют ростовые дефекты, то для анализа дифракционных картин от имплантированной пленочной системы была использована информация об их характеристиках в неимплантированных образцах, выращенных в идентичных условиях [155] (см. табл. 6, где мощность кластеров $A_c = \Gamma \varepsilon R_c^3$, эффективные радиусы $R_{\text{eff}} = \sqrt{H|A_c|}E$ для кластеров и $R_{\text{eff}} = R_L \sqrt{H|b|}E$ для дислокационных петель, радиусы кластеров получены при фиксированном значении параметра деформации на границе кластера с кристаллической матрицей $\varepsilon = 0,03$). Кроме этого, была принята во внимание деформация, вызванная несоответствием между постоянными решеток пленки и подложки, профиль которой также был установлен в работе [155] и который оказался немонотонным по всей толщине пленки и на значительной глубине подложки. Это позволило корректным образом учесть влияние эффектов ДР от имеющихся дислокационных петель и кластеров на форму дифракционных пиков от пленки и подложки, а также на распределения интенсивности когерентного и диффузного рассеяния на хвостах дифракционных профилей, где они перекрываются с интенсивностью рассеяния от имплантированного слоя.

Таблица 6

Характеристики дислокационных петель и сферических кластеров
в неимплантированной пленке ЖИГ и подложке ГГГ

		Подложка $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$		Пленка $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$
Дислокационные петли	Радиус R_L , нм	90	5	5
	Эффективный радиус R_{eff} , нм			
	(444)	391	22,5	22,5
	(888)	514	31,5	31,5
	Концентрация n_L , см^{-3}	$1,2 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{15}$
Сферические кластеры	Радиус R_C , нм	8		10
	Мощность A_C , нм^3	9,5		18
	Эффективный радиус R_{eff} , нм			
	(444)	18		25
	(888)	26		36
	Концентрация n_C , см^{-3}	$1 \cdot 10^{14}$		$1 \cdot 10^{14}$

При моделировании деформаций в имплантированной пленочной системе нарушенный имплантацией слой делился на тонкие подслои с толщиной 2 нм, а остальной объем пленки и подложки – на подслои с толщиной порядка нескольких сотен нанометров. При этом считалось, что в результате электронных и ядерных потерь энергии имплантированных ионов образовывались сферические аморфные кластеры с радиусом R_C примерно 1,7 нм и величиной деформации на их границе с матрицей $\varepsilon = 0,03$. В табл. 7 приведены также значения мощности кластеров A_C , которая является инвариантной комбинацией радиуса R_C и деформации ε , т.е. позволяет уточнять значения этих величин при наличии более детальной информации о природе кластеров. Как видно из рис. 24–26, когерентный пик от имплантированного слоя отчетливо наблюдается только на рис. 25. Поэтому этот дифракционный профиль был взят за основу для установления первоначального вида профиля деформации в нарушенном слое (рис. 27). Полученные значения характеристик кластеров и параметров профиля деформации в имплантированном слое приведены в табл. 7.

В дальнейшем, при подгонке дифракционных профилей на рис. 24 и 26, где пик от имплантированного слоя замаскированный пиком от подложки (рис. 24) или находится за пределами измеренного углового диапазона (рис. 26), значения параметров, которые определяют форму профиля деформации, оставались фиксированными, а менялись только концентрации кластеров, возникших вследствие электронных и ядерных потерь энергии имплантированных ионов.

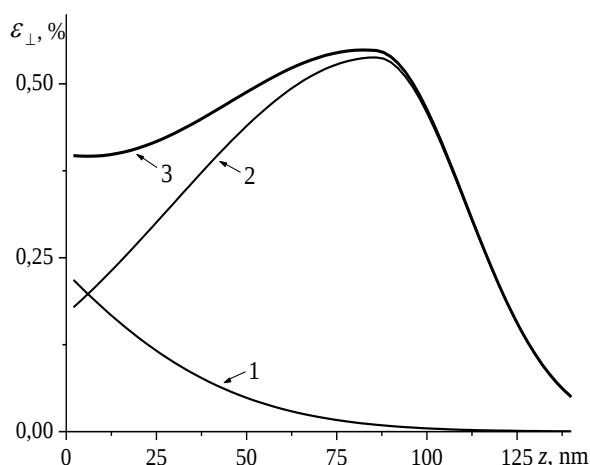


Рис. 27. Профили деформации в пленке ЖИГ вследствие электронных (1), ядерных (2) и суммарных (3) потерь энергии имплантированных ионов F^+ с энергией $E = 90$ кэВ и дозой $D = 6 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$

Таблица 7

Максимальные концентрации кластеров и характеристики профилей деформации, статического фактора Кривоглаза – Дебая – Валлера и коэффициента поглощения вследствие ДР в имплантированном слое пленки ЖИГ при разных дозах имплантированных ионов F^+ с энергией 90 кэВ

$D, \text{см}^{-2}$	1×10^{13}	6×10^{13}	2×10^{14}
$\varepsilon_{\perp}^{\text{nucl,max}}, \%$	0,10	0,54	1,79
$\varepsilon_{\perp}^{\text{el,max}}, \%$	0,04	0,22	0,73
$n_C^{\text{nucl,max}}, \text{см}^{-3}$	$1,1 \times 10^{19}$	6×10^{19}	2×10^{20}
$t_0^{\text{nucl}}, \text{нм}$	85	85	85
$\sigma_1, \text{нм}$	80	80	80
$\sigma_2, \text{нм}$	35	35	35
$n_C^{\text{el,max}}, \text{см}^{-3}$	$1,1 \times 10^{19}$	6×10^{19}	2×10^{20}
$t_0^{\text{el}}, \text{нм}$	-75	-75	-75
$\sigma_{\text{el}}, \text{нм}$	80	80	80
$n_C^{\text{max}}, \text{см}^{-3}$	$1,12 \times 10^{19}$	$6,12 \times 10^{19}$	$2,04 \times 10^{20}$
$R_C, \text{нм}$	1,7	1,7	1,7
$A_C, \text{нм}^3$	0,09	0,09	0,09
E_{444}^{min}	0,9995	0,9972	0,9907
E_{888}^{min}	0,9979	0,9888	0,9631
$\mu_{\text{ds},444}^{\text{max}}/\mu_0$	0,004	0,022	0,071
$\mu_{\text{ds},888}^{\text{max}}/\mu_0$	0,005	0,027	0,086

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что при всех трех дозах имплантации максимальная величина аморфизации в имплантированном слое невелика (см. рис. 28), например, показатель статического фактора Кривоглаза – Дебая – Валера для максимальной дозы имплантации и рефлекса (888) составляет примерно 0,1 (табл. 7). Аналогично, для всех трех доз имплантации небольшие значения даже в максимуме принимает зависящий от угла $\Delta\theta$ коэффициент поглощения вследствие ДР в имплантированном слое (см. рис. 29 и табл. 7). Тем не менее, оба эти параметра имеют существенное влияние на форму когерентной компоненты интенсивности дифракции от имплантированного слоя. В целом, значения характеристик дефектов и параметров профиля деформации были установлены для всех трех доз имплантации после подгонки измеренных КДО со значениями обычного и взвешенного факторов надежности, которые менялись в пределах от 20 до 30 % для обоих рефлексов.

При имплантации ионами F^+ с дозами $D = 1 \times 10^{13}$ и $6 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ деформация в имплантированном слое не повлияла на форму профиля деформации вследствие несоответствия между пленкой и подложкой (рис. 30). При максимальной дозе $D = 2 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ этот профиль претерпел определенные изменения, которые компенсировали рост упругой деформации в имплантированном слое и существенно повлияли на форму дифракционного пика от подложки (см. рис. 26). Проведенная статистическая обработка измеренных КДО позволила надежно определить эти изменения профиля деформации (значение обычного и взвешенного факторов надежности подгонки составили около 30 % для обоих рефлексов). Таким образом, можно утверждать, что предложенный метод диагностики позволяет выявлять даже небольшие изменения в деформационном состоянии имплантированной пленочной системы.

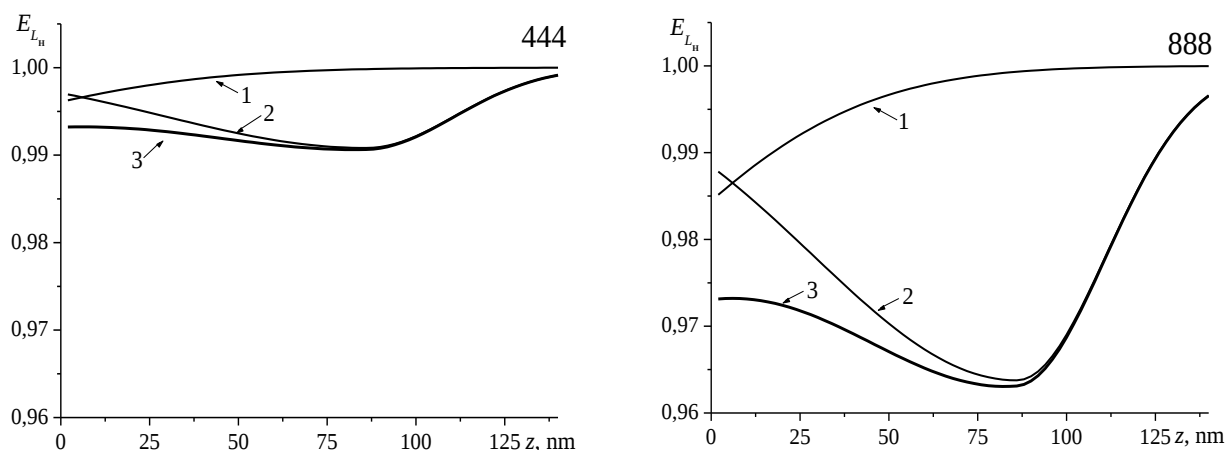


Рис. 28. Профили статического фактора Кривоглаза – Дебая – Валлера («фактора аморфизации») в пленке ЖИГ вследствие электронных (1), ядерных (2) и суммарных (3) потерь энергии имплантированных ионов F^+ с энергией $E = 90$ кэВ и дозой $D = 2 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ для рефлексов (444) и (888)

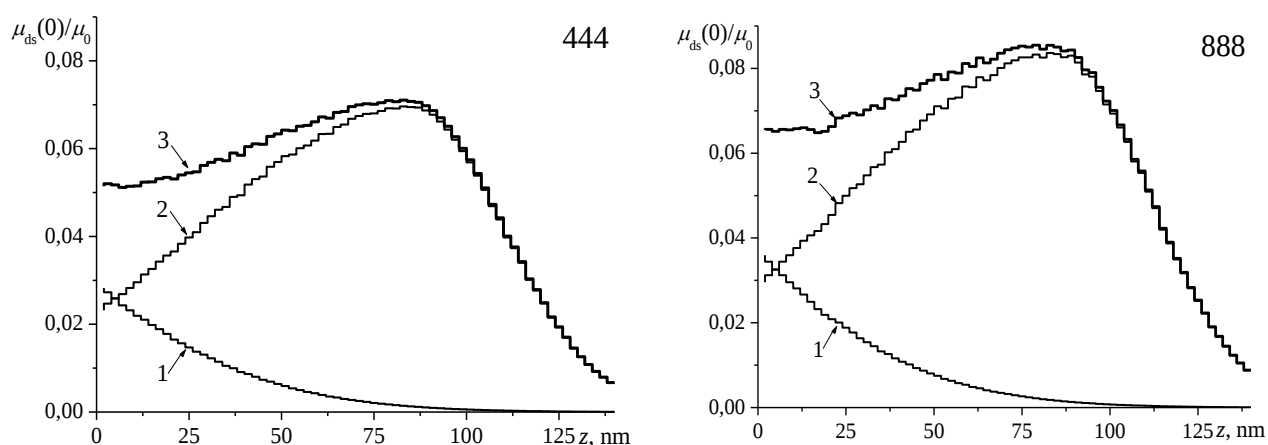


Рис. 29. Профили нормированного коэффициента эффективного поглощения вследствие ДР в имплантированном слое пленки ЖИГ при имплантации ионами F^+ с энергией $E = 90$ кэВ и дозой $D = 2 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ для рефлексов (444) и (888)

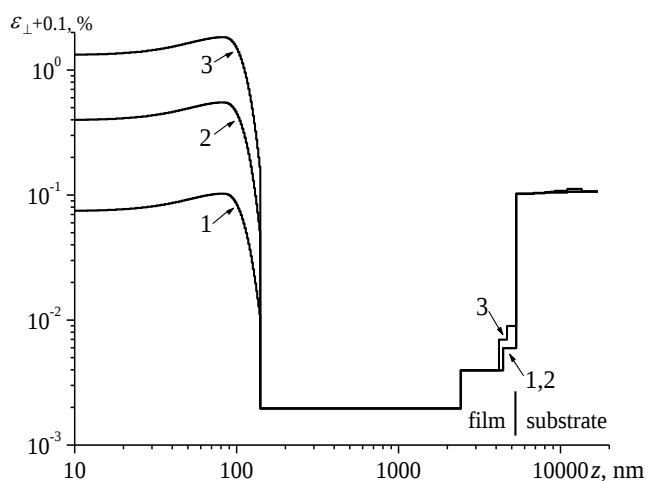


Рис. 30. Профили деформации в пленочной системе ЖИГ/ГТГ/ЖИГ при имплантации ионами F^+ с энергией $E = 90$ кэВ и дозами $D = 1 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (1), $6 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (2), $2 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (3)

Итак, в результате самосогласованной обработки дифракционных профилей от исследуемых имплантированных образцов одновременно для двух рефлексов был получен полный набор характеристик их деформационного состояния и дефектной структуры. Этот набор состоит из параметров неоднородной по глубине деформации в имплантированных и переходных (между пленкой и подложкой) слоях, а также значений статистических характеристик кластеров и дислокационных петель во всех слоях имплантированной системы.

Следует обратить внимание на отличие найденных значений параметров профилей деформации и характеристик дефектов в пленочной системе ЖИГ/ГГГ, имплантированной ионами Si^+ с энергией 90 кэВ, от аналогичных параметров для такой же системы, имплантированной ионами F^+ с той же энергией. Эти данные представлены на рис. 31–37 и в табл. 8, 9.

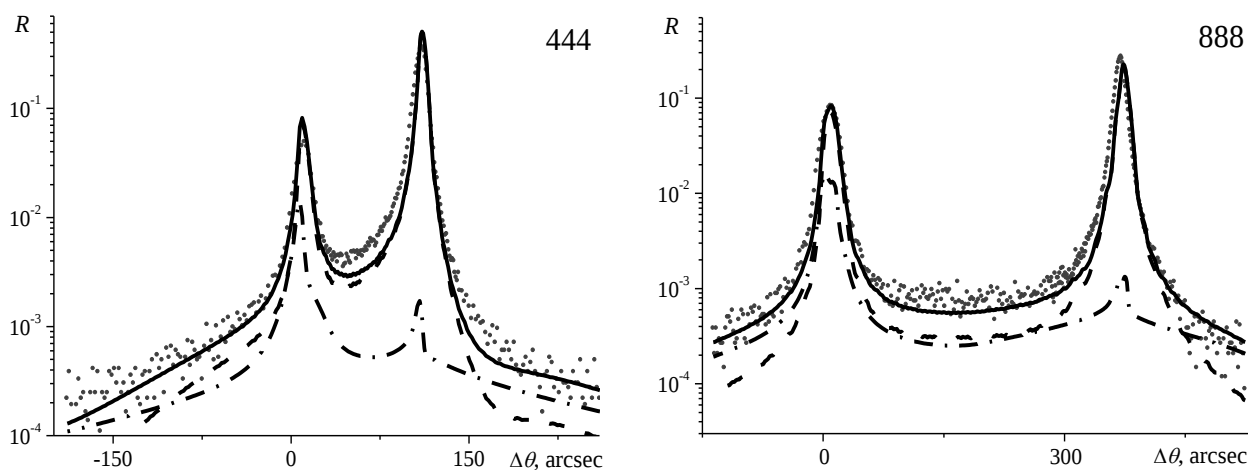


Рис. 31. Измеренные и рассчитанные КДО (соответственно маркеры и сплошные линии) для рефлексов (444) и (888) пленочной системы ЖИГ/ГГГ, имплантированной ионами Si^+ с энергией $E=90$ кэВ и дозой $D=1 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (излучение $\text{CuK}_{\alpha 1}$). Штриховые и штрих-пунктирные линии описывают соответственно когерентную и диффузную компоненты теоретической КДО

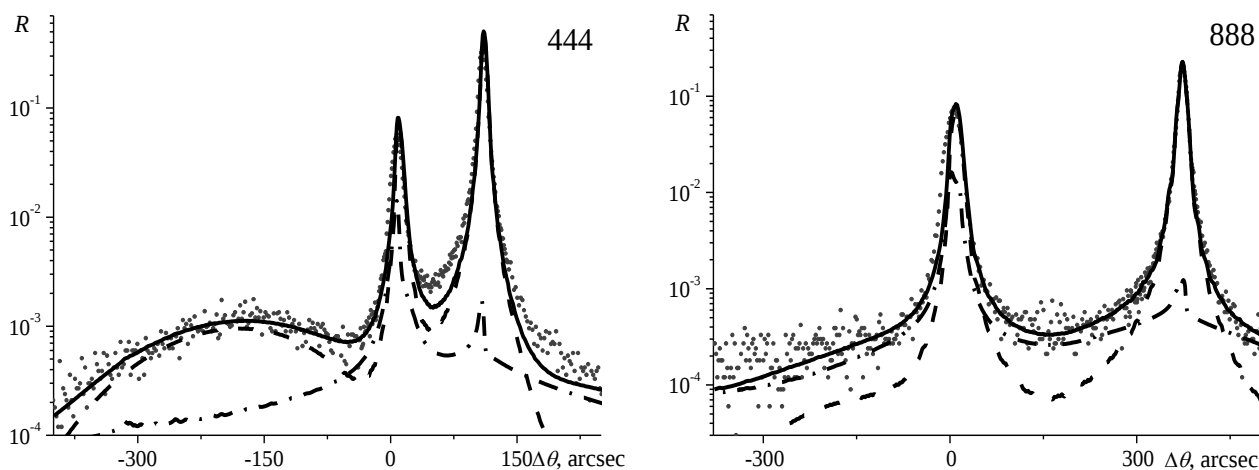


Рис. 32. См. подпись к рис. 31, $D=6 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$

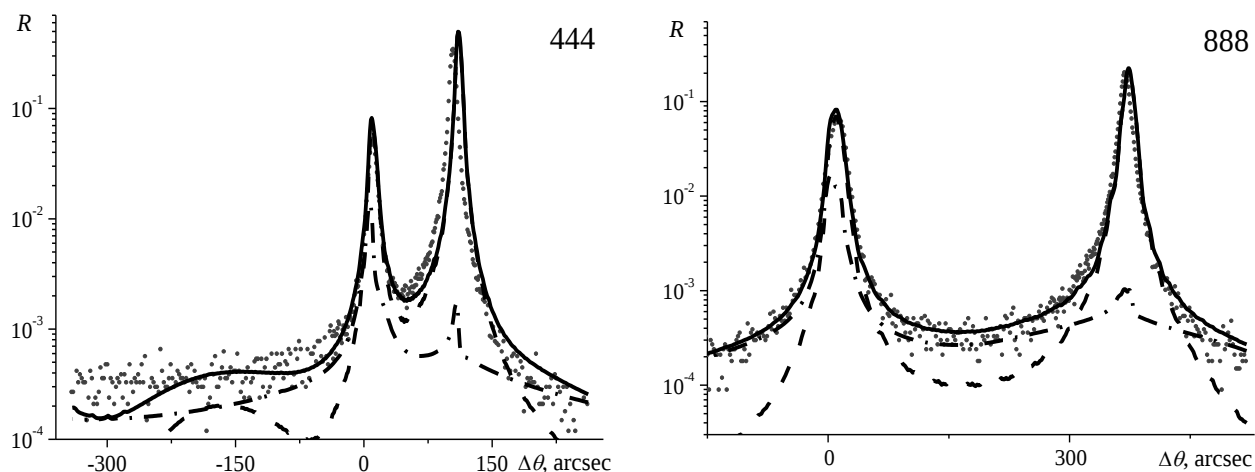


Рис. 33. См. подпись к рис. 31, $D = 2 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$

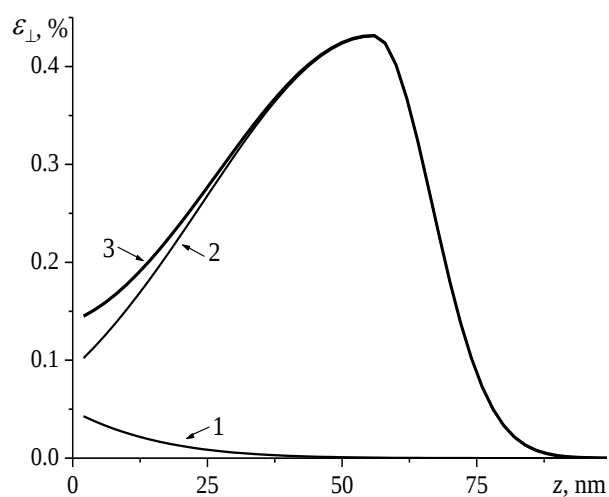


Рис. 34. Профили деформации в пленке ЖИГ вследствие электронных (1), ядерных (2) и суммарных (3) потерь энергии имплантированных ионов Si^+ с энергией $E = 90 \text{ кэВ}$ и дозой $D = 6 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$

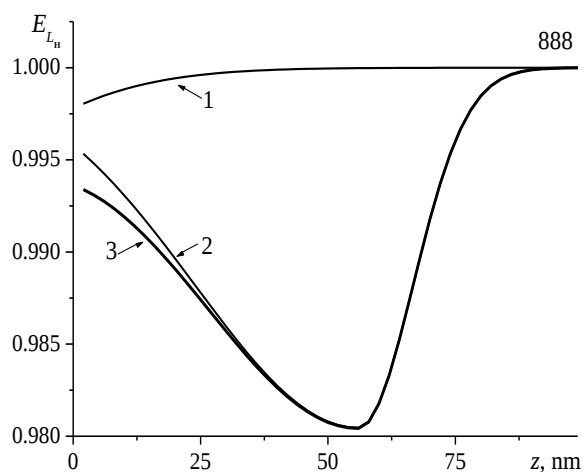
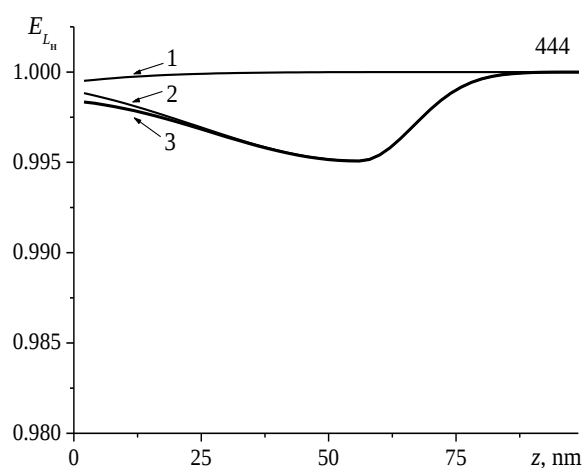


Рис. 35. Профили статического фактора Кривоглаза – Дебая – Валлера («фактора аморфизации») в пленке ЖИГ вследствие электронных (1), ядерных (2) и суммарных (3) потерь энергии имплантированных ионов Si^+ с энергией $E = 90 \text{ кэВ}$ и дозой $D = 2 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ для рефлексов (444) та (888)

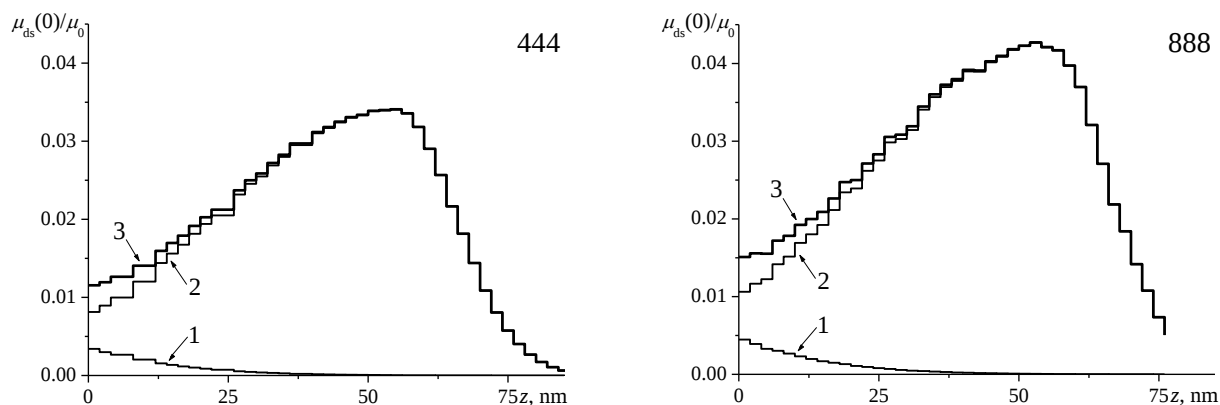


Рис. 36. Профили нормированного коэффициента эффективного поглощения вследствие ДР в имплантированном слое пленки ЖИГ при имплантации ионами Si^+ с энергией $E = 90$ кэВ и дозой $D = 2 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ для рефлексов (444) и (888)

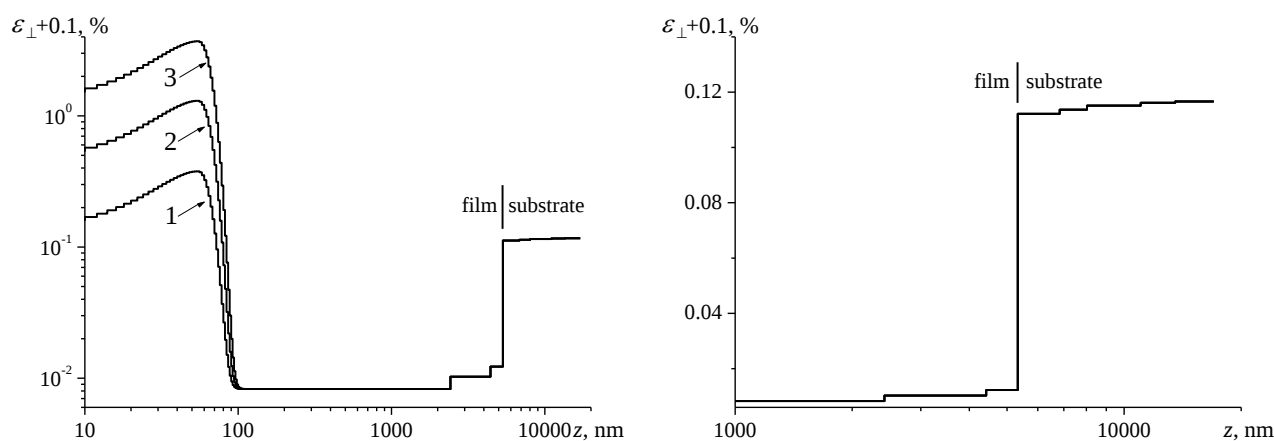


Рис. 37. Профили деформации в пленочной системе ЖИГ/ГТГ/ЖИГ при имплантации ионами Si^+ с энергией $E = 90$ кэВ и дозами $D = 1 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (1), $6 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (2), $2 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (3). Справа показан фрагмент профиля деформации в переходном слое

Таблица 8

Характеристики дислокационных петель и сферических кластеров в неимплантированной пленке ЖИГ и подложке ГТГ

		Подложка $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$		Пленка $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$
Дислокационные петли	Радиус R_L , нм	90	5	5
	Эффективный радиус R_{eff} , нм			
	(444)	391	23	23
	(888)	514	32	32
	Концентрация n_L , см^{-3}	$1,2 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{15}$
Сферические кластеры	Радиус R_C , нм	8		7
	Деформация ε	0,03		-0,0823
	Мощность A_C , нм ³			-18
	Эффективный радиус R_{eff} , нм			
	(444)	18		25
	(888)	26		36
	Концентрация n_C , см^{-3}	$1 \cdot 10^{14}$		$1 \cdot 10^{14}$

Таблица 9

Максимальные концентрации кластеров и характеристики профилей деформации, статического фактора Кривоглаза – Дебая – Валлера и коэффициента эффективного поглощения вследствие ДР в имплантированном слое пленки ЖИГ при разных дозах имплантированных ионов Si^+ с энергией 90 кэВ

$D, \text{см}^{-2}$	1×10^{13}	6×10^{13}	2×10^{14}
$\varepsilon_{\perp}^{\text{nucl,max}}, \%$	0,12	0,43	1,23
$\varepsilon_{\perp}^{\text{el,max}}, \%$	0,01	0,04	0,12
$n_{\text{C}}^{\text{nucl,max}}, \text{см}^{-3}$	2×10^{19}	7×10^{19}	2×10^{20}
$t_0^{\text{nucl}}, \text{нм}$	55	55	55
$\sigma_1, \text{нм}$	45	45	45
$\sigma_2, \text{нм}$	15	15	15
$n_{\text{C}}^{\text{el,max}}, \text{см}^{-3}$	2×10^{19}	7×10^{19}	2×10^{20}
$t_0^{\text{el}}, \text{нм}$	–75	–75	–75
$\sigma_{\text{el}}, \text{нм}$	50	50	50
$n_{\text{C}}^{\text{max}}, \text{см}^{-3}$	2×10^{19}	7×10^{19}	2×10^{20}
$R_{\text{C}}, \text{нм}$	1,5	1,5	1,5
$A_{\text{C}}, \text{нм}^3$	0,06	0,06	0,06
E_{444}^{min}	0,9995	0,9983	0,9951
E_{888}^{min}	0,9980	0,9931	0,9804
$\mu_{\text{ds},444}^{\text{max}}/\mu_0$	0,003	0,012	0,034
$\mu_{\text{ds},888}^{\text{max}}/\mu_0$	0,005	0,016	0,043

В первую очередь привлекает внимание значительное уменьшение вклада в профиль деформации составляющей, которая обусловлена электронными потерями энергии имплантированных ионов по сравнению со вкладом составляющей, которая обусловлена ядерными потерями – отношение их максимальных значений изменяется примерно от 40 % [104] до 10 % (см. рис. 33 и значения параметров в табл. 9). Кроме этого, толщина имплантированного слоя уменьшилась примерно от 125 до 75 нм, а скорость падения составляющей профиля деформации, обусловленная ядерными потерями, стала больше. При этом, профиль приобрел более узкую форму, хотя максимальные значения деформации изменились незначительно.

ВЫВОДЫ

Статистическая динамическая теория дифракции рентгеновских лучей в несовершенных кристаллах со сложным базисом, которая учитывает наличие в них структурных дефектов различных типов, применена для создания теоретической модели дифракции в многослойной кристаллической системе с неоднородно распределенными как между слоями, так и внутри слоев макродеформациями и микродефектами. В созданной модели с помощью рекуррентных соотношений между амплитудами когерентного рассеяния дополнительно учтены динамический характер как когерентного, так и диффузного рассеяния между всеми слоями системы. Это позволило выполнить полностью динамическую интерпретацию дифракционных картин от таких систем, которая, в частности, обеспечивает самосогласованное описание когерентной и диффузной составляющих интенсивности дифракции. Важным достоинством модели является наличие аналитических выражений для диффузной компоненты

коэффициента отражения несовершенных и неоднородных систем и коэффициента эффективного поглощения вследствие ДР, которые связывают их непосредственно со статистическими характеристиками дефектов.

Измерение КДО от монокристаллических пленок ЖИГ $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ на подложке ГТГ $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, имплантированных различными дозами ионов F^+ с энергией 90 кэВ, было проведено с помощью высокоразрешающего ДКД с широко открытым окном детектора. Обработка экспериментальных данных, которая проводилась путем комбинированного анализа измеренных КДО для двух рефлексов с использованием созданной теоретической модели, позволила установить параметры профиля деформации и характеристики структурных дефектов как в имплантированном слое, так и в основном объеме пленки и подложки исследуемых образцов.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности и информативности метода высокоразрешающей динамической дифрактометрии при диагностике дефектной структуры имплантированных несовершенных кристаллических систем. Он позволил при использовании созданной теоретической модели дифракции найти не только величину деформации и степень аморфизации в имплантированном слое, но и характеристики неравномерно распределенных дефектов, которые их вызвали, а также параметры деформации и характеристики дефектов в глубинных слоях таких систем. В частности, этот метод позволяет проводить корректную количественную диагностику деформаций и дефектов, возникающих в результате технологических воздействий в магнитных феррит-гранатовых пленках на немагнитных гранатовых подложках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изложены физические основы и результаты практической реализации многопараметрической диффузнодородинамической комбинированной дифрактометрии характеристик дефектов нескольких типов и параметров сверхструктуры в практически важных для нанотехнологий монокристаллических материалах и многослойных наносистемах с неоднородно распределенными макродеформациями и микродефектами.

Обсуждено открытое авторами и радикально улучшающее функциональные возможности диагностики явление зависимости от условий дифракции характера влияния дефектов на картину динамического рассеяния. Установлена его природа и разработаны принципы экспериментальной реализации на его основе впервые как повышения на порядки величины чувствительности, так и достижения качественного расширения информативных возможностей, а именно создания неразрушающей многопараметрической диагностики. В результате впервые обеспечена возможность однозначного решения обратной задачи восстановления по картине многократного рассеяния в различных условиях дифракции характеристик сразу нескольких типов дефектов и большого числа параметров сверхструктуры монокристаллических изделий нанотехнологий и при этом с радикально повышенной чувствительностью.

В работе на основе созданных авторами моделей многопараметрической диффузнодородинамической комбинированной дифрактометрии выполнена количественная диагностика многопараметрической дефектной структуры в монокристаллах кремния путем комбинированной обработки экспериментальных данных высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии. Определены концентрации и средние размеры дефектов, а именно precipitates кислорода и междоузельных дислокационных петель. На основе созданной модели диффузнодородинамической двухосевой дифрактометрии многослойных систем с неоднородно распределенными от слоя к слою дефектами нескольких типов установлены параметры слоев и характеристики дефектов в многослойной системе с квантовой ямой InGaAsN . Кроме этого, исследованы сверхрешеточные структуры с квантовыми точками и по данным рентгеновской дифрактометрии найдены параметры сверхрешетки и средняя деформация в слое, а также параметры квантовых точек сверхрешетки, и особенности их самоорганизации в периодических структурах.

В работе также созданы обобщенные теоретические модели для случая динамической дифрактометрии ионно-имплантированных пленочных систем со сложной ячейкой и неоднородно распределенными как от слоя к слою, так и внутри слоев макродеформациями разной природы и микродефектами нескольких типов. С помощью высокоразрешающего двух-кристального дифрактометра проведены измерения КДО от монокристаллических пленок железо-иттриевого граната $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ на подложке гадолиний-галлиевого граната $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, которые были имплантированы разными дозами ионов F^+ с энергией 90 кэВ и ионов Si^+ с той же энергией. Обработка измеренных КДО с использованием обобщенной теоретической модели позволила установить параметры профиля деформации и характеристики неоднородно распределенных структурных дефектов как в имплантированных слоях, так и в основном объеме пленок и подложек исследованных образцов.

Литература

1. Von Laue M. Rontgenstrahlinterferenzen (Leipzig: Akademische Verlagsges, 1948).
2. Hammond C. The Basics of Crystallography and Diffraction. 2nd ed (London: Oxford University Press, 2001).
3. James R.W. Solid State Phys. **15**: 55 (1963).
4. Batterman B.W. and Cole H. Rev. Mod. Phys, **36**: 681 (1964).
5. Ахиезер А.И. И.Я. Померанчук, Некоторые вопросы теории ядра (ОГИЗ: 1948).
6. Ковальчук М.В., Кон В.Г. УФН, **149**, № 1: 69 (1986).
7. Krivoglaz M.A. X-Ray and Neutron Diffraction in Nonideal Crystals (Berlin: Springer, 1996).
8. Molodkin V.B., Kovalchuk M.V., Shpak A.P., Olikhovskii S.I., Kyslovskyy Ye.M., Nizkova A.I., Len E.G., Vladimirova T.P., Skakunova E.S., Molodkin V.V., Ice G.E., Barabash R.I. and Karnaukhov I. M. Diffuse Scattering and the Fundamental Properties of Materials (Eds R I Barabash, G E Ice, and P E A Turchi) (New Jersey: Momentum Press, 2009), p. 391.
9. Шпак А.П., Ковальчук М.В., Молодкин В.Б., Низкова А.И., Гинько И.В., Олиховский С.И., Кисловский Е.Н., Лень Е.Г., Белоцкая А.А., Первак Е.В., Молодкин В.В. Способ многопараметрической структурной диагностики монокристаллов с несколькими типами дефектов (Патент Украины № 36075. Зарегистрирован в Государственном реестре патентов Украины на изобретения 10.10.2008 г.).
10. Шпак А.П., Ковальчук М.В., Карнаухов И.М. и др. Успехи физ. мет., **9**, № 3: 305 (2008).
11. Шпак А.П., Ковальчук М.В., Носик В.Л. и др. Металлофиз. новейшие технол., **31**, № 5: 615 (2009).
12. Шпак А.П., Ковальчук М.В., Молодкин В.Б. и др. Успехи физ. мет, **10**, № 3: 229 (2009).
13. Шпак А.П., Ковальчук М.В., Молодкин В.Б., Носик В.Л., Сторишко В.Ю., Булавин Л.А., Карнаухов И.М., Барабаш Р.И., Айс Дж.Е., Низкова А.И., Гинько И.В., Олиховский С.И., Кисловский Е.Н., Татаренко В.А., Лень Е.Г., Белоцкая А.А., Первак Е.В., Молодкин В.В. Способ многопараметрической структурной диагностики монокристаллов с несколькими типами дефектов (Патент Украины № 89594. Зарегистрирован в Государственном реестре патентов Украины на изобретения 10.02.2010 г.).
14. Шпак А.П., Молодкин В.Б., Ковальчук М.В. и др. Металлофиз. новейшие технол. **31**, № 7: 927 (2009).
15. Шпак А.П., Молодкин В.Б., Ковальчук М.В. и др. Металлофиз. новейшие технол., **31**, № 8: 1041 (2009).
16. Шпак А.П., Молодкин В.В. Металлофиз. новейшие технол., **32**, № 11: 1435 (2010).
17. Шпак А.П., Ковальчук М.В., Молодкин В.Б. и др. Актуальные вопросы современного естествознания, вып. 8 (2011).
18. Молодкин В.Б., Шпак А.П., Ковальчук М.В. и др. Металлофиз. новейшие технол., **33**, № 8: 1081 (2011).
19. Молодкин В.Б., Шпак А.П., Ковальчук М.В. и др. Успехи физических наук, **181**, № 7: 681 (2011).
20. Молодкин В.Б., Ковальчук М.В., Мачулин В.Ф. и др. Успехи физики металлов, **12**, № 3: 295 (2011).

21. Молодкин В.Б., Тихонова Е.А. ФММ, **24**, № 3: 385 (1967).
22. Молодкин В.Б. ФММ, **25**, № 3: 410 (1968).
23. Молодкин В.Б. ФММ, **27**, № 4: 582 (1969).
24. Молодкин В.Б. Металлофизика, **2**, № 1: 3 (1980).
25. Molodkin V.B. Phys. Metals, **3**: 615 (1981).
26. Molodkin V.B., Olikhovskii S.I. and Osinovskii M.E. Phys. Metals, **5**: 1 (1984).
27. Molodkin V.B., Olikhovskii S.I. and Osinovskii M.E. Phys. Metals, **5**: 847 (1985).
28. Kochelab V.V., Molodkin V.B., Olikhovskii S.I. and Osinovskii M.E. Phys. Status Solidi A, **108**, No. 1: 67 (1988).
29. Даценко Л.И., Молодкин В.Б., Осинковский М.Е. Динамическое рассеяние рентгеновских лучей реальными кристаллами (Киев: Наукова думка, 1988).
30. Molodkin V.B., Olikhovskii S.I., Kislovskii E.N. et al. Phys. Status Solidi B, **227**, No. 2 : 429 (2001).
31. Olikhovskii S.I., Molodkin V.B., Kislovskii E.N. et al. Phys. Status Solidi B, **231**, No. 1: 199 (2002).
32. Олиховский С.И., Молодкин В.Б., Кононенко О.С. и др. Металлофиз. новейшие технол., **29**: № 7: 887 (2007).
33. Олиховский С.И., Молодкин В.Б., Кононенко О.С. и др. Металлофиз. новейшие технол., **29**, № 9: 1225 (2007).
34. Олиховский С.И., Молодкин В.Б., Низкова А.И. и др. Металлофиз. новейшие технол., **29**, № 10: 1333 (2007).
35. Молодкин В.Б., Низкова А.И., Шпак А.П. и др. Дифрактометрия наноразмерных дефектов и гетерослоев кристаллов (Киев: Академперіодика, 2005).
36. Багов А.Н., Динаев Ю.А., Дышеков А.А., Оранова Т.И., Хапачев Ю.П., Кютт Р.Н., Лень Е.Г., Молодкин В.В., Низкова А.И., Шпак А.П., Елюхин В.А. Рентгенодифракционная диагностика упруго-напряженного состояния наногетероструктур (Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2008).
37. Shpak A.P., Molodkin V.B., Olikhovskii S.I. et al. Phys. Status Solidi A, **204**, No. 8: 2651 (2007).
38. Molodkin V.B., Olikhovskii S.I., Kislovskii E.N. et al. Phys. Status Solidi A, **204**, No. 8: 2606 (2007).
39. Молодкин В.Б., Гудзенко Г.И., Олиховский С.И., Осинковский М.Е. Металлофизика, **5**, № 3: 10 (1983).
40. Молодкин В.Б., Олиховский С.И., Осинковский М.Е. и др. Металлофизика, **6**, № 2: 18 (1984).
41. Молодкин В.Б., Олиховский С.И., Осинковский М.Е. и др. Металлофизика, **6**, № 3: 105 (1984).
42. Molodkin V.B., Olikhovskii S.I., Osinovskii M.E. et al. Phys. Status Solidi A, **87**, No. 2 : 597 (1985).
43. Немошкаленко В.В., Молодкин В.Б., Кисловский Е.Н. и др. Металлофизика, **16**, № 2: 48 (1994).
44. Шпак А.П., Молодкин В.Б., Низкова А.И. Успехи физ. мет., **5**, № 1: 51 (2004).
45. Низкова А.И., Молодкин В.Б., Московка И.А. Металлофиз. новейшие технол., **26**, № 6: 783 (2004).
46. Молодкин В.Б., Немошкаленко В.В., Низкова А.И. и др. Металлофиз. новейшие технол., **22**, № 3: 3 (2000).
47. Молодкин В.Б., Олиховский С.И., Дмитриев С.В. и др. Металлофиз. новейшие технол., **27**, № 12: 1659 (2005).
48. Thomas J.E., Baldwin T.O., Dederichs P.H. Phys. Rev. B, **3**: 1167 (1971).
49. Кютт Р.Н., Ратников В.В. Металлофизика, **7**, № 1: 36 (1985).
50. Bond W.L. Acta Crystallogr., **13**: 814 (1960).
51. Молодкин В.Б., Олиховский С.И., Шелудченко Б.В. и др. Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии, **6**, № 3: 785 (2008).
52. Молодкин В.Б., Олиховский С.И., Шелудченко Б.В. и др. Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии, **6**, № 3: 807 (2008).
53. Кисловский Е.Н., Решетник О.В., Владимірова Т.П. и др. Металлофиз. новейшие технол., **29**, № 5: 701 (2007).

54. Молодкин В.Б., Олиховский С.И., Шелудченко Б.В. и др. Металлофиз. новейшие технол., **30**, № 9: 1173 (2008).
55. Молодкин В.Б., Олиховский С.И., Кисловский Е.Н. и др. Металлофиз. новейшие технол., **19**, № 12: 25 (1997).
56. Molodkin V.B., Olikhovskii S.I., Len E.G. et al. Phys.stat.sol. (a), **206**, No. 8: 1761 (2009).
57. Пинскер З.Г. Рентгеновская кристаллооптика (Москва: Наука, 1982).
58. Тихонова Е.А. ФТТ, **9**, No. 2: 516 (1967).
59. Dederichs P.H. Phys.Rev.B, **1**, No. 4: 1306 (1970).
60. Немошкаленко В.В., Молодкин В.Б., Олиховский С.И. и др. Металлофиз. новейшие технол., **22**, № 2: 51 (2000).
61. Олиховский С.И., Кисловский Е.Н., Молодкин В.Б. и др. Металлофиз. новейшие технол., **22**, № 6: 3 (2000).
62. В.Г. Барьяхтар, Е.Н. Гаврилова, В.Б. Молодкин и др., Металлофизика, **14**, № 11: 68 (1992).
63. Nemoshkalenko V.V., Molodkin V.B., Olikhovskii S.I. et al. Nucl. Instrum. and Meth. in Physics Research A, **308**, No. 1: 294 (1991).
64. Молодкин В.Б., Олиховский С.И., Дмитриев С.В. и др. Металлофиз. новейшие технол., **28**, № 7: 953 (2006).
65. Молодкин В.Б., Дмитриев С.В., Первак Е.В. и др. Металлофиз. новейшие технол., **28**, № 8: 1047 (2006).
66. Шпак А.П., Молодкин В.Б., Дмитриев С.В. и др. Металлофиз. новейшие технол., **30**, № 9: 1189 (2008).
67. Даценко Л.И., Кисловский Е.Н. УФЖ, **20**, № 5: 810 (1975).
68. Datsenko L.I., Kislovsky E.N. and Prokopenko I.V. Ukr. Fiz. Zh., **22**: 513 (1977).
69. Molodkin V.B., Olikhovskii S.I., Kislovskii E.N. et al., Phys. Rev. B, **78**: 224109 (2008).
70. Олиховский С.И., Молодкин В.Б., Кисловский Е.М. и др. Металлофиз. новейшие технол., **27**, № 7: 947 (2005).
71. Олиховский С.И., Молодкин В.Б., Кисловский Е.М. и др. Металлофиз. новейшие технол., **27**, № 9: 1251 (2005).
72. Каганер В.М., Инденбом В.Л. Металлофизика, **8**, № 1: 25 (1986).
73. Дмитриенко В.Е., Каганер В.М. Металлофизика, **9**, № 1: 71 (1987).
74. Белов А.Ю., Каганер В.М. Металлофизика, **9**, № 4: 79 (1987).
75. Бушуев В.А. Кристаллография, **39**, № 5: 803 (1994).
76. Бушуев В.А. Кристаллография, **39**, № 6: 983 (1994).
77. Пунегов В.И., Харченко А.В. Кристаллография, **43**, № 6: 1078 (1998).
78. Pavlov K.M. and Punegov V.I. Acta Cryst. A, **A56**, No. 2: 227 (2000).
79. Holy V. and Gabrielyan K.T. Phys. Stat. Sol. (b), **140**: 39 (1987).
80. Поляков А.М., Чуховский Ф.Н., Пискунов Д.И. ЖЭТФ, **99**, № 2: 589 (1991).
81. Kato N. Acta Cryst., **A36**, No. 5: 763 (1980).
82. Molodkin V.B., Olikhovskii S.I., Kislovskii E.N. et al. Phys.Rev. B, **78**: 224109, (2008).
83. Borghesi A., Pivac B., Sassella A. and Stella A. J. Appl. Phys., **77**: 4169 (1995).
84. Лизунова С.В., Молодкин В.Б., Олиховский С.И. и др. Металлофиз. новейшие технол., **33**, № 6: 791 (2011).
85. Лизунова С.В., Молодкин В.Б., Олиховский С.И. и др. Металлофиз. новейшие технол., **33**, №7: 855 (2011).
86. Magneto-Optical Imaging (Eds. by T.H. Johansen and D.V. Shantsev) (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers: 2004).
87. Gambino R.J. and Suzuki T. Magneto-Optical Recording Materials (New York: Wiley-IEEE Press: 1999).
88. Zvezdin A.K. and Kotov V.A. Modern Magneto-optics and Magneto-optical Materials (New York: Taylor and Francis Group: 1997).
89. Wehls T., Körner T., Leitenmeier S. et al. Phys. Status Solidi A, **208**, No. 2: 252 (2011).
90. Любутич И.С., Гаврилюк А.Г. УФН, **179**, № 10: 1047 (2009).
91. Yamasaki Y., Kohara Y. and Tokura Y. Phys. Rev. B, **80**, No. 14: 140412(R) (2009).
92. Wojciechowski R.J., Lehmann-Szweykowska A., Micnas R. et al. Phys. Rev. B, **69**, No. 21: 214434 (2004).

93. Xu Y.-N., Gu Z. and Ching W.Y. J. Appl. Phys., **87**, No. 9: 4867 (2000).
94. Dumont Y., Keller N., Popova E. et al. Phys. Rev. B, **76**, No. 10: 104413 (2007).
95. Tupitsyn I.S., Stamp P.C.E. and Burin A.L. Phys. Rev. Lett., **100**, No. 25: 257202 (2008).
96. Donnerberg H. and Catlow C.R.A. Phys. Rev. B, **50**, No. 2: 744 (1994).
97. Ordóñez-Romero C.L., Kalinikos B.A., Krivosik P. et al. Phys. Rev. B, **79**, No. 14: 144428 (2009).
98. W. Noun, E. Popova, F. Bardelli et al., Phys. Rev. B, **81**, No. 5: 054411 (2010).
99. Gerda E., Rüffer R., Winkler H. et al. Phys. Rev. Lett., **54**, No. 8: 835 (1985).
100. Балбашов А.М., Лисовский Ф.В., Раев В.К. и др. Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах: Справочник (ред. Н.Н. Евтихьева, Б.Н. Наумова) (М.: Радио и связь: 1987).
101. Aichele T., Lorenz A., Hergt R. and Görnert P. Cryst. Res. and Technol., **38**, No. 7–8: 575 (2003).
102. Tucciarone A. and De Gasperis P. Thin Solid Films, **114**, No. 1–2: 109 (1984).
103. Wigen P.E. Thin Solid Films, **114**, No. 1–2: 135 (1984).
104. Ryssel H. and Ruge I. Ion implantation (Chichester: John Wiley and Sons: 1986).
105. Williams J.S. and Poate J.M. Ion implantation and beam processing (Sydney: Academic Press: 1984).
106. Nastasi M., Mayer J.W. and Hirvonen J.K. Ion-solid interactions: fundamentals and applications (Cambridge: Cambridge University Press: 2004).
107. Ion Beams and Nano-Engineering (Eds. by D. Ila, P. K. Chu, N. Kishimoto et al.) (Warrendale: Materials Research Society: 2009).
108. Krashennnikov A.V. and Nordlund K. J. Appl. Phys., **107**, No. 7: 071301 (2010).
109. Афанасьев А.М., Александров П.А., Имамов Р.М. Рентгенодифракционная диагностика субмикронных слоев (М.: Наука: 1989).
110. Bowen D.K. and Tanner B.K. High resolution X-ray diffractometry and topography (London: Taylor and Francis Ltd: 1998).
111. Holy V., Pietsch U. and Baumbach T. High-resolution X-ray scattering from thin films and multilayers (Berlin Heidelberg: Springer Verlag: 1998).
112. Fewster P.F. X-ray scattering from semiconductors (London: Imperial College Press: 2000).
113. Speriosu V.S. J. Appl. Phys., **52**, No. 10: 6094 (1981).
114. Speriosu V.S. and Vreeland T. J. Appl. Phys., **56**, No. 6: 1591 (1984).
115. Петрашень П.В. ФТТ, **16**, № 8: 2168 (1974).
116. Петрашень П.В. ФТТ, **17**, № 9: 2814 (1975).
117. Afanasev A.M., Kovalchuk M.V., Kovev E.K. and Kohn V.G. Phys. Status Solidi A, **42**, No. 1: 415 (1977).
118. Kyutt R.N., Petrashen P.V. and Sorokin L.M. Phys. Status Solidi A, **60**, No. 2: 381 (1980).
119. Kohn V.G., Kovalchuk M.V., Imamov R.M. and Lobanovich E.F. Phys. Status Solidi A, **64**, No. 1: 435 (1981).
120. Кон В.Г., Прилепский М.В., Суходрева И.М. Поверхность, № 11: 122 (1984).
121. Tapfer L. and Ploog K. Phys. Rev. B, **33**, No. 8: 5565 (1986).
122. Podorov S.G., Hölzer G., Förster E. and Faleev N.N. Phys. Status Solidi A, **169**, No. 1: 9 (1998).
123. Belyaev Yu.N. and Kolpakov A.V. Phys. Status Solidi A, **76**, No. 2: 641 (1983).
124. Vardanyan D.M., Manoukian H.M. and Petrosyan H.M. Acta Crystallogr. A, **41**, No. 3: 212 (1985).
125. Halliwell M.A.G., Lyons M.H. and Hill M.J. J. Cryst. Growth., **68**: 523 (1984).
126. Andreeva M.A., Rosete K. and Khapachev Yu.P. Phys. Status Solidi A, **88**: 455 (1985).
127. Bartels W.J., Hornstra J. and Lobeek D.J. Acta Crystallogr. A, **42**, No. 6: 539 (1986).
128. Wie C.R., Tombrello T.A. and Vreeland T. J. Appl. Phys., **59**, No. 11: 3743 (1986).
129. Андреева М.А., Борисова С.Ф., Хапачев Ю.П. Металлофизика, **8**, № 5: 44 (1986).
130. Holy V., Kuběna J. and Ploog K. Phys. Status Solidi B, **162**, No. 2: 347 (1990).

131. Dimer M., Gerdau E., Rüffer R. et al. J. Appl. Phys., **79**, No. 12: 9090 (1996).
132. Stepanov S.A., Kondrashkina E.A., Köhler R. et al. Phys. Rev. B, **57**, No. 8: 4829 (1998).
133. Nikulin A.Yu., Stevenson A.W. and H. Hashizume, Phys. Rev. B, **53**, No. 13: 8277 (1996).
134. Nikulin A.Yu. and Petrashen P.V. J. Appl. Phys., **82**, No. 3: 989 (1997).
135. Nikulin A.Yu., Stevenson A.W., Hashizume H. et al. Semicond. Sci. Technol., **12**, No. 3: 350 (1997).
136. Петрашень П.В. Металлофизика, **8**, № 1: 35 (1986).
137. Петрашень П.В., Чуховский Ф.Н. Металлофизика, **8**, № 3: 45 (1986).
138. Punegov V.I. Phys. Status Solidi A, **136**, No. 1: 9 (1993).
139. Павлов К.М., Пунегов В.И., Фалеев Н.Н. ЖЭТФ, **106**, № 6: 1967 (1995).
140. Пунегов В.И., Фалеев Н.Н. ФТТ, **38**, № 1: 255 (1996).
141. Пунегов В.И., Павлов К.М., Подоров С.Г., Фалеев Н.Н. ФТТ, **38**, №. 1: 264 (1996).
142. Pavlov K.M. and Punegov V.I. Acta Crystallogr. A, **54**, No. 2: 214 (1998); **54**, No. 4: 515 (1998).
143. Shreeman P.K. and Matyi R.J. J. Appl. Cryst., **43**, No. 3: 550 (2010).
144. Shreeman P.K. and Matyi R.J. Phys. Status Solidi A, **208**, No. 11: 2533 (2011).
145. Kato N. Acta Crystallogr. A, **36**, No. 5: 770 (1980).
146. Бушуев В.А. Кристаллография, **34**, № 2: 279 (1989).
147. Бушуев В.А. ФТТ, **31**, № 11: 70 (1989).
148. Владимирова Т.П., Середенко Р.Ф., Молодкин В.Б. и др. Металлофиз. новейшие технол., **29**, № 6: 711 (2007).
149. Олиховский С.И., Молодкин В.Б., Кисловский Е.Н. и др. Металлофиз. новейшие технол., **27**, № 5: 653 (2005).
150. Олиховский С.И., Молодкин В.Б., Кисловский Е.Н. и др. Металлофиз. новейшие технол., **27**, № 2: 197 (2005).
151. Шпак А.П., Молодкин В.Б., Олиховский С.И. и др. Металлофиз. новейшие технол., **27**, № 6: 721 (2005).
152. Olikhovskii S.I., Molodkin V.B., Skakunova E.S. et al. Phys. Status Solidi A, **206**, No. 8: 1790 (2009).
153. Пилипов В.М., Остафийчук Б.К., Владимирова Т.П. и др. Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології, **9**, № 2: 375 (2011).
154. Владимирова Т.П., Пилипов В.М., Остафийчук Б.К. и др. Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології, **9**, № 3: 505 (2011).
155. Пилипов В.М., Олиховский С.И., Владимирова Т.П. и др. Металлофиз. новейшие технол., **33**, № 9: 1145 (2011).
156. Lagomarsino B. and Tucciarone A. Thin Solid Films, **114**, No. 1–2: 45 (1984).
157. Коцюбинський В.О., Немошкаленко В.В., Остафійчук Б.К. та ін. Металлофиз. новейшие технол., **23**, № 11: 1449 (2001).
158. Остафійчук Б.К., Федорів В.Д., Коцюбинський В.О., Яремій І.П. Фізика і хімія твердого тіла, **4**, № 1: 112 (2003).
159. Остафійчук Б.К., Ткачук В.М., Ткачук О.М. та ін., Доп. НАН України, № 7: 82 (2008).
160. Ostafiychuk B.K., Fedoriv V.D., Yaremiy I.P. et al. Phys. Status Solidi A, **208**, No. 9: 2108 (2011).
161. Кривоглаз М.А. Дифракция рентгеновских лучей и нейтронов в неидеальных кристаллах (К.: Наук. Думка: 1983).
162. Cembali F., Servidori M., Gabilli E. and Lotti R. Phys. Status Solidi A, **87**, No. 1: 225 (1985).
163. Zaumseil P., Winter U., Cembali F. et al., Phys. Status Solidi A, **100**, No. 1: 95 (1987).
164. Zaumseil P. and Winter U. Phys. Status Solidi A, **120**, No. 1: 67 (1990).

А.И. Липкин

ПРОСТРАНСТВО, ВРЕМЯ И ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

A.I. Lipkin

SPACE, TIME AND RELATIVITY THEORY

В статье рассматривается ряд вопросов о пространстве и времени, возникающих в связи с появлением теории относительности. Главным среди них является старый спор о том является ли пространство абсолютным, т.е. вместилищем для материальных объектов (тел, сред, и т.п.), или оно определяется наличием тел и других материальных объектов, отношением между ними (реляционная концепция пространства). Аналогичный вопрос ставится и про время, где место тел занимают события. Приводимый анализ показывает, что СТО и ОТО согласуются с представлением о существовании абсолютных, но неметризованных, пространстве и времени как вместилище тел, сред и событий и реляционных метрик, зависящих от наличия и расположения тел и сред. Это утверждение распространяется и на квантованные поля в квантовой теории поля (КТП), где «вакуумное» состояние отвечает пустым полям, а не пустому пространству, т.е. это состояние поля без внутренних возбуждений, находящегося в пространстве, подобно среде. Подчеркивается принципиальное отличие силовых полей, рассматриваемых в КТП, от гравитации в ОТО. Из этого следует необоснованность постановки вопроса о квантовании гравитации по аналогии с квантованными полями.

Теорию относительности (специальную (СТО) и особенно общую (ОТО)) иногда называют теорией пространства и времени, имея в виду, во-первых, ее вклад в начатый Лейбницем спор с ньютоновской концепцией абсолютного пространства и времени – считается что она разрешает его в пользу Лейбница, во-вторых, провозглашение связи пространства и времени в 4-мерном многообразии Минковского, в-третьих, сведение сил гравитации в ОТО к кривизне этого 4-мерного многообразия. Рассмотрим насколько справедливы эти утверждения, добавив к этому еще один важный аспект: методологическую новизну хода Эйнштейна, суть которой состоит в том, что он в СТО и ОТО не создает новых «первичных идеальных объектов», каковыми, например, являются заряженная частица и электромагнитное поле в электродинамике, а работает с метрикой пространства и времени.

1. СПОР ОБ ОНТОЛОГИИ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ: АБСОЛЮТИЗМ VS. РЕЛЯТИВИЗМ

Наиболее важным из перечисленных выше вопросов нам представляется онтологический спор о том является ли пространство *вместилищем* для материальных объектов, обладающим независимым существованием, или лишь свойством отношений между материальными объектами. Первой позиции в античности, по сути, придерживался Демокрит, утверждая, что «... в действительности же существуют только атомы и пустота» [Маковельский, 1946, с. 224]. Здесь «пустота» – аналог «пространства» Нового времени – мыслится наряду с атомами как истинное бытие-реальность (в парменидовском смысле). В том же духе в Новое время И. Ньютон в своих «Математических началах натуральной философии» ввел понятия *абсолютных* пространства и времени:

«I. Абсолютное, истинное математическое время само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно, и иначе называется длительностью...

II. Абсолютное пространство по самой своей сущности, безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным» [Ньютон, 1989, с. 30–32].

С последователем Ньютона – Кларком, спорил Лейбниц, утверждая *реляционный* характер пространства (и времени): «Говорят, – писал он, – что пространство не зависит от положения тел. На это я отвечаю, что оно, конечно, не зависит от того или иного положения тел, тем не менее оно является таким порядком, который делает возможным само расположение тел и в силу которого они в своем существовании друг подле друга обладают отношением расположения, подобно тому как время представляет собой тот же порядок в смысле последовательности их существования» [Полемика, 1960, с. 58]. И дальше: «Я вовсе не говорю, что материя и пространство одно и то же, а лишь утверждаю, что *без материи нет и пространства*, и что *пространство само по себе не представляет собой абсолютной реальности*» [Там же, с. 84]¹ (здесь и далее выделение курсивом мое. – А.Л.). Эта полемика носила теолого-метафизически-логический характер, где важнейшую роль играло понятие Бога и принцип «достаточного основания» Лейбница.

На современном языке позиция реляционной концепции пространства и времени может быть выражена так: «Пространство и время – общие формы координации материальных объектов и их состояний. Пространство – это совокупность отношений, выражающих координацию сосуществующих объектов, их расположение друг относительно друга и относительную величину (расстояния и ориентация); время – совокупность отношений, выражающих координацию сменяющих друг друга состояний (явлений), – их последовательность и длительность» [Ахундов 1965, с. 227].

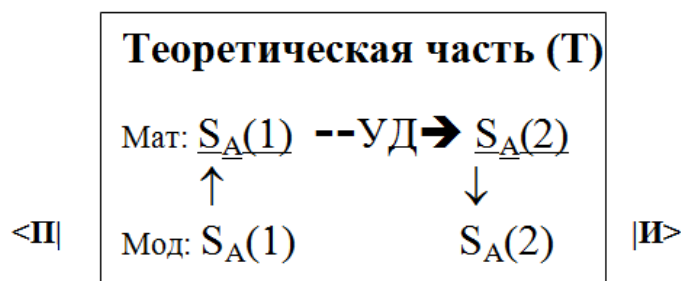
2. ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ В ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Рассмотрим специальную и общую теории относительности (СТО и ОТО), исходя из предложенной в [Липкин 2001; 2006 а, б] структуры физического знания, где физика представляется в виде совокупности разделов физики, каждый из которых имеет свои основания в виде системы постулатов, задающих базовые понятия раздела физики, в которые входят «первичные идеальные объекты» (ПИО) данного раздела физики (частицы, поля и т.п.). Из последних строятся модели различных физических явлений и объектов, которые будем называть «вторичными идеальными объектами» (ВИО). В таком представлении физического знания в нем выделяются, наряду с тремя позитивистскими уровнями: 1) эмпирических фактов; 2) эмпирических законов и феноменологических теорий; 3) теоретических законов и теорий конкретных явлений (ВИО), еще и 4) уровень оснований раздела физики, где задаются ПИО, из которых строятся ВИО, т.е. теории 3-го уровня. По сути этот 4-й уровень появляется в «Математических началах натуральной философии» И. Ньютона, а в геометрии, на структуру которой ориентировалась и физика, этот 4-й уровень существовал со времен Евклида. Примерами этих четырех уровней в механике могут служить: для уровня эмпирических фактов – наблюдения Тихо-Браге, для уровня эмпирических закономерностей – законы Кеплера; для уровня теоретических законов – теория Ньютона движения планет, а для уровня оснований – первая часть «Математических начал натуральной философии» Ньютона.

Схема описывает структуру физического знания 4-го уровня – структуры оснований раздела физики (тогда физическая система А – это ПИО) и 3-го уровня (тогда физическая си-

¹ В последнем пятом письме Лейбниц дает следующее определение пространства: «Если дать что-то вроде определения, то местом (place) является то, что для А и В одинаково, если отношение, которое В имеет в своем сосуществовании к С, Е, F, J и т. д., целиком совпадает с отношением, которое А имеет в своем сосуществовании к ним, предполагая, что нет никакой причины для изменения соотношения самих С, Е, F, J и т. д. Можно было бы также сказать, не вдаваясь в подробности, что под местом мы понимаем то, что присуще разным существованиям в разные времена, когда они совершенно совпадают в своих отношениях сосуществования к некоторым состояниям, предполагаемым в тот или иной момент фиксированными. Фиксированными существованиями называются такие, для которых не было основания изменить свой порядок сосуществования с другими, следовательно, в которых, иными словами, не произошло движения. Пространство, наконец, – это то, что получается из совокупности всех мест... Оно [пространство] может быть только идеальным ведь содержит оно ничто иное, как некий порядок в котором дух постигает применение отношений» (Лейбниц т. 1, с. 479). Это определение Лейбница претендовало на логическую строгость (а для Лейбница логика была первоосновой всей его философии), но как указано в [Гайденок 1987], оно не является идеальным.

стема А – это ВАО). Здесь теоретическая часть состоит из двух слоев – «модельного» и «математического». В центре ее оказывается физическая модель физического процесса (явления), состоящего в переходе физической системы А (содержащей электроны, атомы и т.п. физические объекты) из одного состояния $S_A(1)$ в другое $S_A(2)$. С помощью математического слоя (в этом его смысл и функция), содержащего соответствующие математические образы $\mathbf{A}$ и $\mathbf{S}_A(t)$ (будем подчеркиванием обозначать принадлежность к математическому слою), а также **уравнение движения** (УД) – центральный элемент математического слоя, с помощью которого описывается связь между различными состояниями². Через модельный слой осуществляется связь теоретической части с процедурами приготовления $\langle\Pi|$ (системы и ее исходного состояния) и измерения $|\mathbf{I}\rangle$ (величин, характеризующих систему и ее состояния).



Схема

Чтобы понять о чем теория относительности проще всего начать с проблем, которые вызвали их появление. Интересно, что создание СТО и ОТО является ответом не на появление новых экспериментальных данных, а на возникновение противоречия между старыми и новыми разделами физики. Все начинается с проблемы распространения принципа относительности для инерциальных систем отсчета на новую электродинамику. Создание СТО – это снятие возникшего вокруг принципа относительности противоречия между ньютоновской механикой и максвелловской электродинамикой. Решение этой проблемы, с математической точки зрения, требовало перехода от преобразований Галилея к преобразованиям Лоренца при переходе от одной инерциальной системы отсчета (и.с.о.) к другой. Но далее возникал вопрос о физической основе возникавших из этих преобразований сокращения длин и замедления времени. Лоренц попытался списать эти эффекты на воздействие эфира на движущиеся в нем тела (экспериментально это нельзя было бы выявить даже в принципе). Эйнштейн предложил другой механизм, связанный с процедурами измерения: он перенес свойства неизменности при переносе из одной инерциальной системы отсчета в другую с твердого метра на скорость света c , т.е. сменил главный эталон. Нетрудно показать, что наделение «твердого метра» (и часов) свойством инвариантности по отношению к переносу от одной инерциальной системы отсчета к другой ведет к преобразованиям Галилея, а если наделить этим свойством скорость света, то получим преобразования Лоренца³.

Поскольку речь идет о процедурах измерения, то *эти эффекты имеют место в любом разделе физики*, где есть длины (размеры) и интервалы времени, т.е. практически во всех разделах физики (за исключением, возможно, равновесной термодинамики). Поэтому для них появляются наряду со старым нерелятивистскими новые релятивистские формулировки. При

² Уравнение движения содержит, в том или ином виде, наряду с математическими образами физической системы А (в виде основной части лагранжиана, гамильтониана и т.п.), также математический образ внешнего воздействия $F(t)$ (оно не выписано в модельном слое, чтобы не загромождать схему).

³ Лоренцево сокращение длин и замедление времени легко выводятся с помощью использования световых часов, в виде двух зеркал, расположенных перпендикулярно движению и.с.о. и луча света бегающего между ними вместо маятника [Фейнман и др., 1965, с. 12–15]). Замедление времени в световых часах следует из того, что путь проходимый лучом в «неподвижной» и.с.о. будет длиннее, чем в «движущейся», аналогичным образом можно показать относительность одновременности и, следующее из нее сокращение длин (длина метра переносится из одной и.с.о. в другую посредством одновременных зарубок, но поскольку одновременное в «движущейся» и.с.о. будет неодновременным в «неподвижной» и.с.о., то поправка даст сокращение длины, отвечающее лоренцевому сокращению).

этом СТО не создает новых «первичных идеальных объектов» (ПИО), каковыми, например, являются заряженная частица и электромагнитное поле в электродинамике, а лишь модифицирует их, делает релятивистскими. Последнее предполагает также некоторые модификации уравнений движения, чтобы сделать их лоренц-инвариантными при соблюдении *принципа соответствия*, требующего, чтобы при стремлении (v/c) к нулю (v – скорость и.с.о.) новые уравнения движения превращались в старые. Но эти поправки не меняют существенно ПИО (за исключением случая квантовой теории поля) и главным и принципиально новым в СТО было изменение эталона в процедурах измерения. В результате в СТО *метрики* пространства (длины) и времени (интервалы и одновременность) становятся *зависимыми от движения*.

Если СТО возникает как результат снятия противоречия между ньютоновской механикой и максвелловской электродинамикой, то ОТО – это снятие противоречия между ньютоновской теорией тяготения и новой СТО, ибо ньютоновский принцип дальнего действия фактически утверждал бесконечную скорость распространения гравитационного взаимодействия (воздействия), а СТО утверждала, что ничто физическое не может распространяться со скоростью выше скорости света.

3. ДВЕ АЛЬТЕРНАТИВЫ ВЗГЛЯДА НА ГРАВИТАЦИЮ: ГРАВИТАЦИЯ КАК СИЛОВОЕ ПОЛЕ И КАК «КРИВИЗНА»

Предложенное Эйнштейном в ОТО решение опять касается метрики и *не создает новых «первичных идеальных объектов»*. В ОТО Эйнштейн, используя принцип относительности гравитации и ускорения, утверждавший, что локально действие любого гравитационного поля эквивалентно действию соответствующего ускорения («опыт в лифте»), *сводит гравитацию к кривизне*, т.е. к изменению метрики. При этом, хотя «опыт в лифте» относится к обычному 3-мерному пространству, изменение метрики в виде кривизны Эйнштейн вводит в 4-мерном пространстве-времени Минковского. Согласно А.Пайсу в 1912 г. Эйнштейн «усвоил тензорные методы, а в 1916 г. выразил признательность Минковскому за то, что тот значительно облегчил переход от СТО к общей теории относительности» [Пайс, 1989, с. 148]. Действительно, уравнения Эйнштейна в ОТО выражены на языке 4-мерного пространства событий, в котором, по сути, к 4-мерию Минковского добавлена кривизна Римана.

Но есть и альтернативная точка зрения, рассматривающая *гравитацию как силовое поле*. Это *релятивистская теория гравитации* (РТГ) академика А.А. Логунова [Логунов, 1995], которая, по его словам, является «объединением идеи Пуанкаре о гравитационном поле (см. [Принцип относительности, 1935]) как о физическом поле в духе Фарадея-Максвелла с идеей Эйнштейна о римановой геометрии пространства-времени. Уравнения в данной теории существенно отличаются от уравнений Гильберта-Эйнштейна, поскольку в ней сохранено понятие инерциальной системы координат, а *силы гравитации в принципе отличаются от сил инерции, т.к. они вызваны физическим полем....* Возникает вопрос: какие опытные факты необходимы, чтобы можно было однозначно сказать о характере геометрии (т.е. выбрать между теориями А. Эйнштейна и А.А. Логунова. – А.Л.)? По нашему мнению, такими фактами могут быть фундаментальные законы сохранения энергии-импульса и момента количества движения.... Это и приводит нас к псевдоэвклидовой геометрии пространства-времени (т.е. геометрии Минковского, геометрии специальной теории относительности. – А.Л.) как самой простейшей. Таким образом, при установлении структуры геометрии пространства-времени естественно исходить не из частных опытных фактов (например, движения света и пробного тела), а из фундаментальных физических принципов, выведенных из обобщения многочисленных опытных данных, относящихся к различным формам материи. В основе РТГ лежит специальная теория относительности, что означает, что пространство Минковского (псевдоэвклидова геометрия пространства-времени) есть фундаментальное пространство для всех *физических полей*, в том числе и для гравитационного. Это положение является необходимым и достаточным, чтобы имели место, как законы сохранения энергии-импульса, так и закон сохранения момента количества движения для вещества и гравитационного поля, вместе взятых». «Согласно этой теории гравитации, однородная и изотропная Вселенная разбивается циклически от большой плотности до минимальной и т.д., и может быть только плоской. Теория предсказывает существование во Вселенной значительной скрытой массы

вещества. Существование во Вселенной «черных дыр» полностью исключается⁴. Теория объясняет все известные наблюдательные факты в Солнечной системе» [Логунов, 1995, с. 188–189 и 187].

Таким образом, Логунов кладет в своей РТГ в качестве основания *законы сохранения* вместо эйнштейновского *принципа эквивалентности* (опыт в лифте, основанный на эквивалентности инертной и тяжелой (гравитационной) массы). А почему бы и нет? Если мы вспомним логику работ Ньютона, так ведь он создавал законы динамики и закон тяготения совместно для решения одной задачи – создать теорию, из которой бы вытекали законы Кеплера для движения планет. Поэтому его законы динамики и тяготения тесно связаны, и пропорциональность (эквивалентность) между инерционной и гравитационной массами вытекает из этой связи через законы Кеплера (эта пропорциональность необходима для выполнения третьего закона Кеплера). Поэтому в моделях Ньютона или Логунова, моделях с силой или полем тяготения эта пропорциональность существует, но она не означает эйнштейновский принцип эквивалентности инерционной и гравитационной масс. Для них, что фиксирует приведенное выше утверждение А.А. Логунова, «силы гравитации принципиально отличаются от сил инерции».

Хотя мейнстрим придерживается концепции А. Эйнштейна, а не А.А. Логунова, аналогия между гравитационным и электромагнитным полем постоянно проскакивает и в мейнстриме. Например, в «Физическом энциклопедическом словаре» в статье «Гравитационные волны» мы читаем: «гравитационные волны» – это «переменное гравитационное поле, которое излучается ускоренно движущимися массами, «отрывается» от своего источника и, *подобно электромагнитному излучению*, распространяется в пространстве со скоростью света» [ФЭС, с. 137]. «Гравитационную волну можно рассматривать как гравитационное поле, движущееся в пространстве. Такая волна должна была бы оказывать *силовое воздействие* на объекты, обладающие массой» – пишет Дж. Вебер [Гравитация и относительность, 1965, с. 179] (Выдел. – А.Л.). Т.е. здесь явно просматривается аналогия гравитационной и электромагнитной волны, а за ней и аналогия гравитационного и электромагнитного поля. Только, если состояние электромагнитного поля определяется значениями напряженностей электрического и магнитного полей, измеряемых пробными зарядами и петлями тока в различных точках пространства, то состояние «гравитационного поля», определяется значениями *ускорения* и ряда пространственных производных ускорения пробного массивного тела в различных точках пространства. Правда, Дж. Вебер добавляет: «Физик-релятивист говорит о гравитационной волне как о распространении кривизны пространства-времени», но тут же уточняет, что «более точным было бы, по видимому, такое определение: гравитационная волна – это возмущение гравитационного *поля*, распространяющееся с конечной скоростью и несущее с собой энергию».

Другой пример репрезентативного для ОТО явления – «гравитационный коллапс»⁵, который в «Физическом энциклопедическом словаре» описывается как «процесс гидродинамического сжатия тела под действием собственных *сил* тяготения» [ФЭС, с. 137] в обычных трехмерном пространстве и одномерном времени (приблизительно то же мы найдем в [Ландау, Лифшиц, 1965, т. 2, с. 384–385]).

Таким образом, хотя общепринятым ответом на вопрос чем является гравитация силовым полем или искривлением (т.е. изменением метрики) пространства и времени считается второй вариант, первый вариант окончательно с физической сцены не сходит.

Заметив эту непоследовательность в изложении ОТО вернемся к последовательной позиции. Тогда по отношению к эйнштейновской ОТО возникает следующий вопрос: физическим смыслом надо наделять искривление в 4-мерном пространстве-времени или в обычном

⁴ Хотя их существование не имеет пока прямых абсолютно достоверных экспериментальных подтверждений, сторонники ОТО утверждают, что существует по крайней мере 11 объектов, которые с очень большой достоверностью являются черными дырами [Черпацук 1996; 1998], поскольку их поведение хорошо описывается в рамках модели пары звезд, одно из которых – «черная дыра» и не описывается в рамках других теоретических моделей. Более того, широко распространенным является утверждение, что центры нашей и многих других галактик являются гигантскими черными дырами.

⁵ «Гравитационный коллапс», как и космологический сценарий «Большого взрыва», связан с сингулярностью решений уравнений ОТО и отсутствует в живущих на периферии научного сообщества альтернативных подходов (эфирной [Arminjon, 2000], Логунова [Логунов, 1995] и др.). Поэтому его можно считать «визитной карточкой» ОТО Эйнштейна.

3-мерном пространстве и 1-мерном времени? В [Липкин 2006 а] обосновывается второй ответ на этот вопрос. В целом типичная процедура постановки и решения задачи в ОТО выглядит следующим образом. Берут «затравочную классическую систему», которая состоит из одного или нескольких выделенных изучаемых тел (или непрерывной среды или электромагнитного поля) и источников гравитационного поля – массивных тел и полей, распределенных в обычных трехмерном пространстве в определенный момент времени. Затем составляют для этой системы тензор энергии-импульса в 4-мерном пространстве-времени, который входит в уравнение, определяющее кривизну (точнее – метрику) в 4-мерном пространстве-времени ОТО. Окончательный же результат (то что выявляет эксперимент) в конце концов всегда представляют на языке движения тел в обычных трехмерном пространстве и одномерном времени.

Итак, в ОТО, как и в СТО, 4-мерное пространство-время выступает как математическое представление, в котором задается уравнение метрики пространства и времени, а в модельном слое мы имеем те же, что и в классической физике модели двигающихся механических массивных тел, сред и электромагнитного поля в обычных трехмерном пространстве и времени, но с другой метрикой (и, как было сказано выше, с несколько иным уравнением движения), а, следовательно, и движением, и другими процедурами измерения, приводящими к относительности длин, интервалов времени, одновременности. При этом в ОТО состояние выделенных изучаемых тел (или непрерывной среды и электромагнитного поля) задается как в классической механике – их положениями и импульсами в обычном 3-мерном пространстве и обычном времени (то же можно сказать про механику сплошных сред и электродинамику).

4. ЕЩЕ РАЗ ОБ АБСОЛЮТИЗМЕ И РЕЛЯТИВИЗМЕ В СВЕТЕ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Теперь можно вернуться к онтологическому вопросу о пространстве и времени – спору абсолютистов и релятивистов. Из приведенного анализа СТО и ОТО следует, что, с одной стороны, по используемой процедуре, содержащейся в «затравочной модели» пространство являетсяместилищем тел (частиц), сред и силовых полей, а с другой, – свойства пространства зависят от того что и как в нем расположено. Эта ситуация может быть описана следующим образом:

1) Существует абсолютное неметризованное пространство, которое служитместилищем для тел, сред и силовых полей (в неметризованном пространстве существует топологический порядок (вдоль линий), но нет расстояния, определяемого метрикой)⁶. В каждой точке пространства существует абсолютное неметризованное время (позволяющее вводить топологический порядок позже раньше, но не интервалы времени и не одновременность в различных точках, которые требуют введения метрики).

2) Метрика пространства и времени релятивна, т.е. зависит от движения системы отсчета и от наполнения пространства (расположения в нем тел, сред и силовых полей), что приводит к тому, что метрика меняется во времени и она разная в разных точках пространства.

3) ОТО дает математическое описание метрики (уравнение изменения метрики) в 4-мерном пространственно-временном многообразии, но физический смысл имеет (по крайней мере пока) совокупность 3-мерного пространства и 1-мерного времени, что фиксируют процедуры измерения и тип работы с моделями⁷.

По сути на первые два пункта указывает Грюнбаум, который в главе 14 под говорящим названием «Отвергает ли общая теория относительности абсолютное пространство?» пишет: «В литературе... по философии и истории науки получил широкое распространение миф относительно дискуссии между абсолютистской и релятивистской теориями пространства. В частности распространяются утверждения, что посленьютоновская эра является свидетелем «окончательного элиминирования понятия абсолютного пространства из теоретической схе-

⁶ «Приписывание действительных чисел точкам в физическом пространстве посредством введения обобщенных криволинейных координат производит только координацию, но не метризацию многообразия физического пространства. Сравнение точек по величинам их координат-знаков, выраженных действительными числами, не может иметь никакого информативного значения в метрическом отношении» [Грюнбаум, 2003, с. 31].

⁷ Этот пункт относится и к концепции Логунова, где 4-мерие надо относить к математическому слою.

мы современной физики» (Джаммер) эйнштейновской общей теорией относительности и что полемика Лейбница-Гюйгенса против Ньютона и Кларка была торжественно реабилитирована...». Действительно «Эйнштейн пытался выполнить «принцип Маха», требуя, чтобы метрическое поле, задаваемое величинами g_{ik} , *исчерпывающим образом* определялось свойствами и отношениями тяготеющей материи и энергии, определяемой величинами T^{ik} (тензора энергии-импульса. – А.Л.). Согласно этой концепции, единичная пробная частица не обладала бы инерцией, если бы вся остальная материя и энергия аннигилировала или была отодвинута на неопределенно большое расстояние. Однако, когда столкнулись с проблемой решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, которые связывают производные g_{ik} и T^{ik} , стало ясно, что, *несмотря на заклинания общей теории относительности, дух ньютоновского абсолютного пространства является прямо таки неистребимым*. Ибо для того, чтобы получить решение этих уравнений, необходимо задать граничные условия «на бесконечности»...!!!» [Грюнбаум, 2003, с. 515–517], в чем нетрудно убедиться, заглянув в [Ландау, Лифшиц, 1965, т. 2].

5. ПРОСТРАНСТВО И ТЯГОТЕНИЕ В КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ ПОЛЯ

В заключение несколько слов о релятивистской квантовой механике, т.е. квантовой теории поля (КТП). В отличие от других разделов физики столкновение нерелятивистской квантовой механики и СТО приводит, в первую очередь, не к изменению метрики, а к появлению нового ПИО – квантованного поля, которое задается своими основаниями. Точнее, речь идет о системе взаимодействующих полей, состоящих из «заряженных» фермионных и связанных с ними (дополнительных) калибровочных полей векторных бозонов, которые взаимодействуют с фермионными посредством чего осуществляется взаимодействие между всеми, входящими в это семейство полями. Первым примером и образцом для всех последующих стала квантовая электродинамика (КЭД), где фермионным полем является электрон-позитронное поле Дирака, а отвечающим им калибровочным полем векторных бозон – поле фотонов (квантованное электромагнитное поле). В современной стандартной модели есть два семейства полей: поля электрослабого взаимодействия и поля сильного взаимодействия (квантовая хромодинамика).

Специфика представления этих полей состоит в том, что все состояния такого семейства полей представляются как действие произведения соответствующей совокупности «операторов рождения» на особое «*вакуумное*» состояние этого семейства (каждый оператор рождения, действуя на вакуумное состояние, порождает частицу поля, отвечающую данному оператору). Вакуумное состояние при этом – низжайшее по энергии состояние, в котором нет возбуждений, отвечающим частицам, но его энергия неопределенна и значение поля не имеет точно нулевое значение (в силу принципа неопределенности для числа частиц и значения поля).

Первый, возникающий здесь вопрос, состоит в том как это вакуумное состояние соотносится с пустым пространством. Для того, чтобы на него ответить, стоит вернуться к логике построения КТП, рожденной в КЭД. Квантованное электромагнитное поле появляется здесь в результате квантования *волн* электромагнитного поля. Но волны по своему происхождению – это возмущения соответствующей среды, частным случаем которой является электромагнитное и аналогичные ему силовые поля [Липкин 2001]. Соответственно отсутствие волн-возбуждений – это не пустое пространство, а «пустое» (т.е. находящееся в состоянии без возбуждений) поле, т.е. вид среды, находящейся в пространстве (заполняющей его часть). Это утверждение остается справедливым и для случая квантованных полей. «*Вакуумное*» состояние поля (и семейства полей) это «пустое» поле, находящееся в пространстве, и его значение и энергия не обязаны быть равными нулю, более того, поскольку возбуждения-волны могут образовываться вокруг любого стационарного состояния поля (вообще говоря, не только стационарного), то эти значения могут быть и большими.

Отсюда следует две интересных гипотезы. Первая состоит в том, что поскольку, согласно СТО, энергия эквивалентна массе, то основное состояние квантованных полей может быть источником «темной материи», которой недостает космологам.

Вторая состоит в том, что поскольку *гравитация не является силовым полем*, то вопрос о квантовании гравитации нельзя некритически рассматривать в логике квантовой теории поля, ко-

торая предназначена для силовых полей. Поэтому влияние гравитации на квантованное поле скорее следует учитывать, как и в других разделах физики, через изменение метрики, а место вопроса о квантовании гравитационного поля занимает древний вопрос о том, являются ли пространство и время непрерывными или дискретными, и этот вопрос лежит в рамках другой логики.

Итак, ответы на поставленные в начале статьи вопросы выглядят теперь следующим образом. В споре Лейбница с Ньютоном (точнее – его последователем Кларком) о том является ли пространство абсолютной сущностью, суть которой состоит в том, чтобы быть вместилищем для вещей (тел и сред), или нет абсолютного пространства, а пространство есть лишь отношения между вещами (аналогично по отношению к событиям выглядит постановка вопроса о времени), обе спорящих стороны частично правы. При этом в большей степени прав Ньютон: *существует абсолютное пространство как вместилище для тел и сред* (включая квантованное поле и в «вакуумном», и возбужденных состояниях), *но это неметризованное пространство, метрика же его зависит от находящихся в нем тел и сред* (и движения) и в этом состоит правота Лейбница и сторонников реляционной концепции пространства. То же можно сказать и о времени: *существует абсолютное неметризованное время как вместилище событий, а его метрика реляционна*. При этом речь идет о 3-мерном пространстве и 1-мерном времени, а не о 4-мерном пространственно-временном многообразии, которое используется в математическом слое для задания уравнения движения и уравнения для метрики в ОТО. Что касается гравитации в ОТО Эйнштейна, то она сводится к изменению этих метрик («искривлению» пространства и времени). Из этого следует, *что гравитация в ОТО* (в отличие от РТГ А.А. Логунова) *не является силовым полем*, и вопрос о квантовании гравитации нельзя некритически рассматривать в логике квантовой теории поля, предназначенной для силовых полей. Важной особенностью СТО и ОТО является также то, что они *не создают новых «первичных идеальных объектов»*, они описывают метрику пространства и времени и в этом смысле являются теориями пространства и времени.

Литература

1. Ахундов М.Д. Пространство и время. Физический энциклопедический словарь / под ред. Б.А. Введенского. – М.: Советская энциклопедия, 1965. – Т. 4.
2. Гайденок П.П. Эволюция понятия науки (XVII–XVIII вв.). – М.: Наука, 1987.
3. Гравитация и относительность. – М.: Мир, 1965.
4. Грюнбаум А. Философские проблемы пространства и времени. – М.: УРСС, 1989.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц И.М. Теоретическая физика. В 10 тт. – М.: Наука, 1965–1987.
6. Лейбниц Г.В. Сочинения. В 4-х т. – М.: Мысль, 1982.
7. Липкин А.И. Основания современного естествознания. Модельный взгляд на физику, синергетику, химию. – М.: Вузовская книга, 2001.
8. Липкин А.И. Место 4-мерного пространства-времени в теории относительности Эйнштейна. Методологический анализ // АВСЕ. – 2006. – № 4.
9. Липкин А.И. Парадигмы, исследовательские программы и ядро раздела науки в физике // Вопросы философии. – 2006. – № 6.
10. Логунов А.А. Теория классического гравитационного поля // УФН. – 1995. – Т. 165, № 2.
11. Маковельский А.О. Древнегреческие атомисты. – Баку, 1946.
12. Ньютон И. Математические начала натуральной философии / пер. с лат. и комм. А.Н. Крылова. – М.: Наука, 1989.
13. Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. – М.: Наука, 1989.
14. Полемика Г. Лейбница с С. Кларком. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1960.
15. Принцип относительности. Г.А. Лоренц, А. Пуанкаре, А. Эйнштейн, Г. Минковский // Сборник работ классиков релятивизма. – Л.: ОНТИ, 1935.
16. ФЭС: Физический энциклопедический словарь. – М.: Сов. энциклопедия, 1983.
17. Черепашук А.М. Массы черных дыр в двойных системах // УФН. – 1996. – Т. 166, № 8.
18. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 2. – М.: Мир, 1965.

И.И. Чернушевич, Т.И. Шустова, А.Ю. Юрков

РОЛЬ ВЕГЕТАТИВНОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ В ПАТОГЕНЕЗЕ ТИМПАНОСКЛЕРОЗА

ФГУ Санкт-Петербургский НИИ уха, горла, носа и речи
Минздравсоцразвития России

Проведено исследование клинических и морфологических особенностей тимпаносклероза у пациентов с нейровегетативными расстройствами. Полученные данные свидетельствуют о необходимости учитывать функциональную активность вегетативной нервной системы у больных тимпаносклерозом и дополнять хирургическое лечение терапевтическими мероприятиями, направленными на коррекцию нейровегетативных расстройств.

I.I. Chernushevich, T. I. Shustova, A.Yu. Yurkov

CLINICAL AND MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF TYMPANOSCLEROSIS IN PATIENTS WITH NEUROVEGETATIVE DISORDERS

S.-Peterburg

The study of clinical and morphological features of tympanosclerosis in patients with neurovegetative disorders was performed. The findings suggest it's necessary to take into account the functional activity of the autonomic nervous system in patients with tympanosclerosis and to complement the surgical treatment with therapeutic methods aimed to neurovegetative disorders correction.

Тимпаносклероз – форма гнойного поражения среднего уха, характеризующаяся образованием в слизистой оболочке своеобразных очагов (тимпаносклеротических бляшек), которые ограничивают подвижность элементов звукопроводящей цепи [10, 13, 28].

В морфологической литературе очаговый склероз рассматривают как один из признаков продуктивной фазы воспаления, отличающейся прогрессирующим характером пролиферации соединительнотканых элементов. В ряде случаев явления пролиферации способствуют ограничению патологического очага и считаются признаками затухания воспалительного процесса, однако прогрессирующий характер пролиферации свидетельствует об его переходе в хроническую форму [16].

Доля больных тимпаносклерозом в структуре пациентов с патологией слуха, обусловленной хроническими гнойными и поствоспалительными фибропластическими процессами в среднем ухе, значительна и составляет, по данным различных авторов, от 5,3 % до 33 % [14, 20, 28, 29]. Существует мнение, что в последние годы наметилась тенденция к увеличению частоты встречаемости тимпаносклероза [21].

Данные исследований, направленных на изучение тимпаносклероза, позволили прояснить многие клинические, морфологические, гистохимические аспекты этого заболевания, однако важные вопросы, касающиеся патогенеза тимпаносклероза, до сих пор не имеют ответа [10, 24 – 27].

В настоящее время отмечено повышение интереса к клинико-морфологическим и клинико-физиологическим характеристикам тимпаносклероза. Это обусловлено развитием реконструктивной хирургии среднего уха, связанной с разработкой наиболее рациональных методов слухоулучшающих операций и профилактикой рецидивов.

Клиническая практика показывает, что становление, течение и исход различных заболеваний определяется множеством факторов, среди которых состояние вегетативной нервной системы (ВНС) пациента является одним из наиболее значимых. Было установлено, что тканевой метаболизм и реактивность тканей по отношению к патогенным раздражителям во многом зависят от состояния адаптационно-трофической функции ВНС, а при ее нарушении происходят глубокие изменения тканевого метаболизма с развитием патологических состояний [1, 15]. Что касается воспаления, то темпы его развития и исход различны в зависимости от влияния нейрогуморальных факторов, при этом самые ранние изменения в фокусе воспаления возникают в нервных окончаниях и волокнах [16].

В научной литературе сложилось представление о том, что уровень неспецифической резистентности организма имеет решающее значение и в патогенезе воспалительных заболеваний среднего уха, так как клинические особенности средних отитов свидетельствуют против монопольной роли инфекции в развитии различных форм воспаления в среднем ухе, заставляя искать объяснение частых обострений хронического процесса, возникающих иногда при действии весьма незначительных патогенных стимулов, в изменении реактивных свойств организма [12, 18, 19]. К таким изменениям, в частности, относится нарушение адаптационно-трофической функции вегетативной нервной системы (ВНС), обеспечивающей адекватные защитные и компенсаторно-приспособительные реакции тканей и органов в ответ на неблагоприятное воздействие внешней и внутренней среды [8, 15]. В клинко-экспериментальном исследовании нейровегетативной составляющей патогенеза гнойного среднего отита установлено, что при нарушении нервной трофики в слизистой оболочке среднего уха замедляются темпы развития воспаления, усиливаются альтеративные и экссудативные изменения, свидетельствующие о хронизации процесса, а продуктивная фаза может принимать прогрессирующее течение с переходом к патологическому разрастанию эпителиальной и соединительной ткани [7]. При тимпаносклерозе в соединительнотканых структурах среднего уха проявляются признаки гиалиновой дистрофии: ткань становится бледной, плотной и расслаивающейся. В гиалиновые массы выпадают соли кальция. Всё это даёт основание расценивать тимпаносклероз как неспецифический дегенеративно-дистрофический процесс, который, по мнению многих авторов, может иметь место при любом хроническом воспалении [18]. Среди механизмов развития тимпаносклероза выделяют нарушения кровообращения, сосудисто-тканевой проницаемости, иммунитета и метаболизма белков соединительной ткани, однако вопрос о роли нейровегетативного компонента в его патогенезе до сих пор не ставился.

В связи с этим **целью настоящего исследования** явилось изучение клинко-морфологических особенностей тимпаносклероза у больных с признаками нейровегетативных расстройств.

ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

Обследовано 110 пациентов в возрасте от 17 до 66 лет, поступивших в Санкт-Петербургский НИИ уха, горла, носа и речи в плановом порядке для оперативного лечения по поводу хронического среднего отита (мезотимпанита).

Во всех случаях функциональная диагностика состояния ВНС проводилась натощак в день операции с 7–30 до 9 часов утра в комфортных лабораторных условиях.

Исследование заключалось в определении вегетативного тонуса (ВТ), вегетативной реактивности (ВР) и вегетативного обеспечения деятельности (ВОД), и осуществлялось с помощью специального компьютеризированного комплекса «ВНС-Спектр», предназначенного для исследования электрической и механической деятельности сердечно-сосудистой системы с программным обеспечением «Поли-Спектр» по программе «ЭКГ + дыхание».

ЭКГ выполняли в I стандартном отведении с наложением активных электродов на правую и левую руки, а заземляющего электрода – на правую ногу. Дыхательную активность измеряли посредством штатного датчика дыхания. Исследование включало регистрацию данных в горизонтальном и вертикальном положениях в течение 5 и 6 минут соответственно.

Программное обеспечение комплекса «Поли-Спектр» автоматически вычисляет индекс напряжения в горизонтальном положении (ИН1) – показатель, наиболее полно характеризующий степень участия ВНС в автоматизированной регуляции сердечного ритма и позволяющий оценить ВТ, а также соотношение индексов напряжения – ИН2 (в вертикальном положении) к ИН1 (в горизонтальном положении) – показатель, определяющий ВР, и, косвенно, ВОД.

Расчет ИН программно осуществляется путем обработки ЭКГ, согласно методу, предложенному Баевским Р.М. [3, 4]. В зависимости от значения ИН1 определяется уровень ВТ (табл. 1).

Таблица 1

Определение уровня вегетативного тонуса
по значению индекса напряжения в покое

ИН1	ВТ
Менее 35	Сниженный (симпатикоастения)
35–100	Нормальный (эйтония)
Более 100	Повышенный (симпатикотония)

ВР определяли по соотношению индексов напряжения в вертикальном и горизонтальном положении (ИН2/ИН1) при различных значениях ИН1 согласно табличным данным (табл. 2). Оценка ВР производилась по 3 категориям: нормэргическая, гиповэргическая и гиперэргическая [5].

Таблица 2

Определение вегетативной реактивности по соотношению индексов
напряжения в вертикальном и горизонтальном положении (ИН2 / ИН1)
при различных значениях ИН1 (Н.А. Белоконов, М.Б. Кубергер, 1987)

ИН1	ВР		
	Гиповэргическая	Нормэргическая	Гиперэргическая
Менее 30	< 1	1–3	> 3
30–60	< 1	1–2,5	> 2,5
61–90	< 0,9	0,9–1,8	> 1,8
Более 90	< 0,7	0,7–1,5	> 1,5

Распределение пациентов на 2 группы осуществлялось на основании интраоперационных находок. В группу наблюдения вошли 60 пациентов, у которых были обнаружены характерные тимпаносклеротические очаги вне зависимости от их выраженности и локализации. Остальные 50 больных с мезотимпанитом без проявлений тимпаносклероза составили группу сравнения. Средний возраст (лет) в группах составил $40,6 \pm 3,5$ и $36,9 \pm 3,3$ соответственно.

Клинико-морфологические особенности тимпаносклероза анализировали на основе данных гистологического и гистохимического исследования операционного материала, содержащего фрагменты тимпаносклеротически измененных участков слизистой оболочки среднего уха, в том числе барабанной перепонки.

Гистологическое исследование операционного материала проводили традиционным способом с окраской гематоксилином и эозином. В 16 случаях операционный материал содержал визуально неизмененные участки слизистой оболочки барабанной полости, которую замораживали в криостате при температуре -25°C для дальнейшей гистохимической обработки. Вегетативные адренергические нервные волокна выявляли при помощи инкубации гистологических препаратов в 2 % растворе глиоксиловой кислоты, образующей интенсивно люминесцирующие соединения с биогенными аминами в тканях [23, 30]. Применяли глиоксиловую кислоту, приготовленную на 0,1 М фосфатном буфере (рН 7,0). После постановки гистохимической реакции препараты изучали в люминесцентном микроскопе ЛЮАМ-Р8 (светофильтр СЗС с длиной волны 480 нм).

При статистической обработке использовались методы расчёта 95 % доверительного интервала, парный двухвыборочный t-тест для средних, двухвыборочный t-тест с разными дисперсиями, а также критерий Хи-квадрат Пирсона.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для предварительной оценки функционального состояния ВНС у обследованных больных проведён анамнестический опрос. В большинстве случаев больные отмечали признаки нейровегетативной дистонии, которые отличались полисистемностью: со стороны сердечно-сосудистой системы – дискомфорт и периодические боли в левой половине грудной клетки, ощущение перебоев или замираний сердца, цефалгии сосудистого генеза при артериальной гипо- или гипертензии; со стороны дыхательной системы – затруднение дыхания, одышка; со стороны желудочно-кишечного тракта – абдоминальные боли, метеоризм, запоры или диарея. Кроме того многие больные отмечали наличие головокружений, ощущение неустойчивости походки, диффузный или локальный гипергидроз, мышечно-тонические феномены, нарушение ритма «сон – бодрствование».

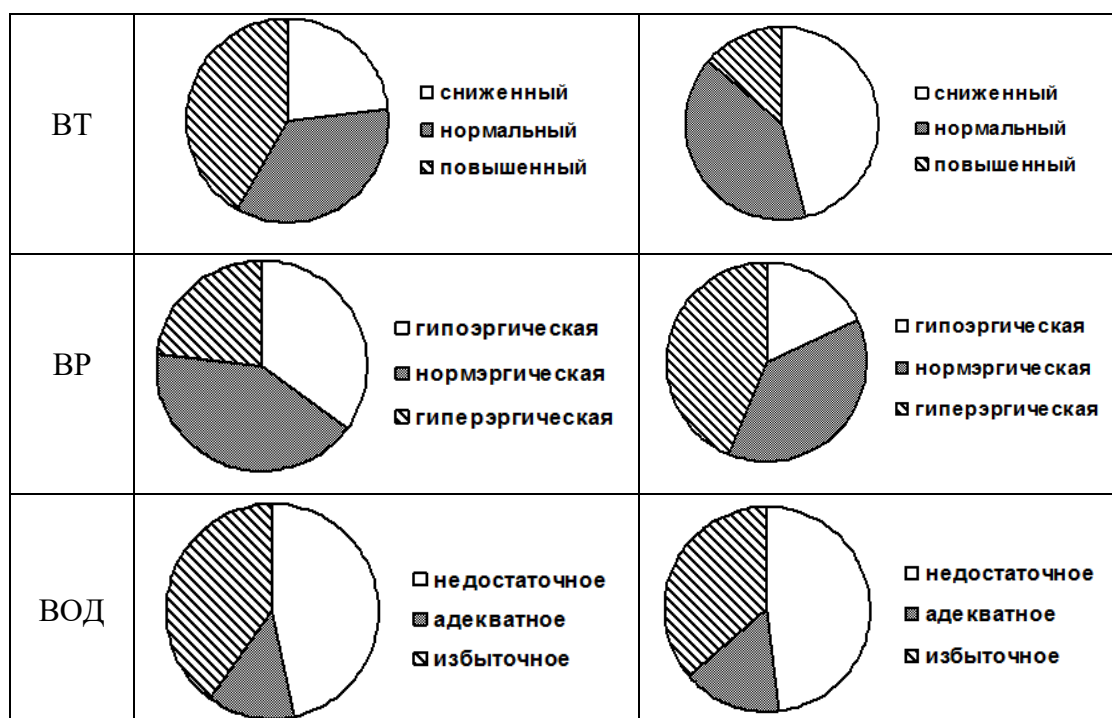
При аппаратурном измерении параметров, определяющих состояние ВНС, обнаружено, что между средними значениями ИН1, также, как и между средними значениями соотношения ИН2/ИН1 у больных обеих групп наблюдались статистически значимые ($p < 0,05$) различия (табл. 3). Среднее значение ИН1 в группе пациентов с тимпаносклерозом было существенно выше, чем в контрольной группе (рис. 1). Среднее значение соотношения ИН2/ИН1 в группе пациентов с тимпаносклерозом, напротив, было значительно ниже, чем в группе больных с мезотимпанитом (рис. 2). Между средними значениями прироста частоты сердечных сокращений (ЧСС) в ортостатической пробе у пациентов обеих групп статистически значимых различий не обнаружено ($p > 0,05$) (табл. 3, рис. 3).

Таблица 3

Средние значения ИН1, индекса ИН2/ИН1 и прироста ЧСС

Группа	Индекс ИН1	ИН2/ИН1	Прирост ЧСС (%)
Тимпаносклероз	$91,69 \pm 18,69$	$1,54 \pm 0,35$	$28,9 \pm 5,26$
Мезотимпанит	$61,24 \pm 17,68$	$2,69 \pm 0,61$	$31,8 \pm 4,64$
Для всех	$77,84 \pm 13,1$	$2,07 \pm 0,35$	$30,22 \pm 3,52$

Таблица 4



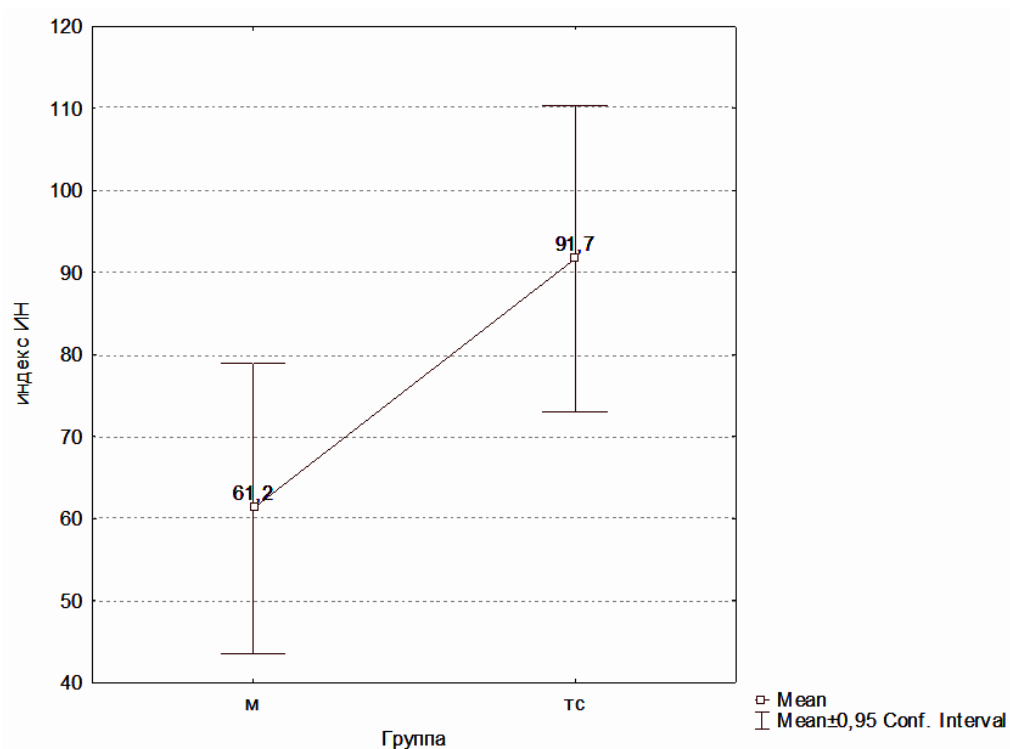


Рис. 1. Сравнение средних значений показателя ИИ1 в двух группах, где М – группа больных мезотимпанитом без тимпаносклероза, а ТС – группа пациентов с тимпаносклерозом

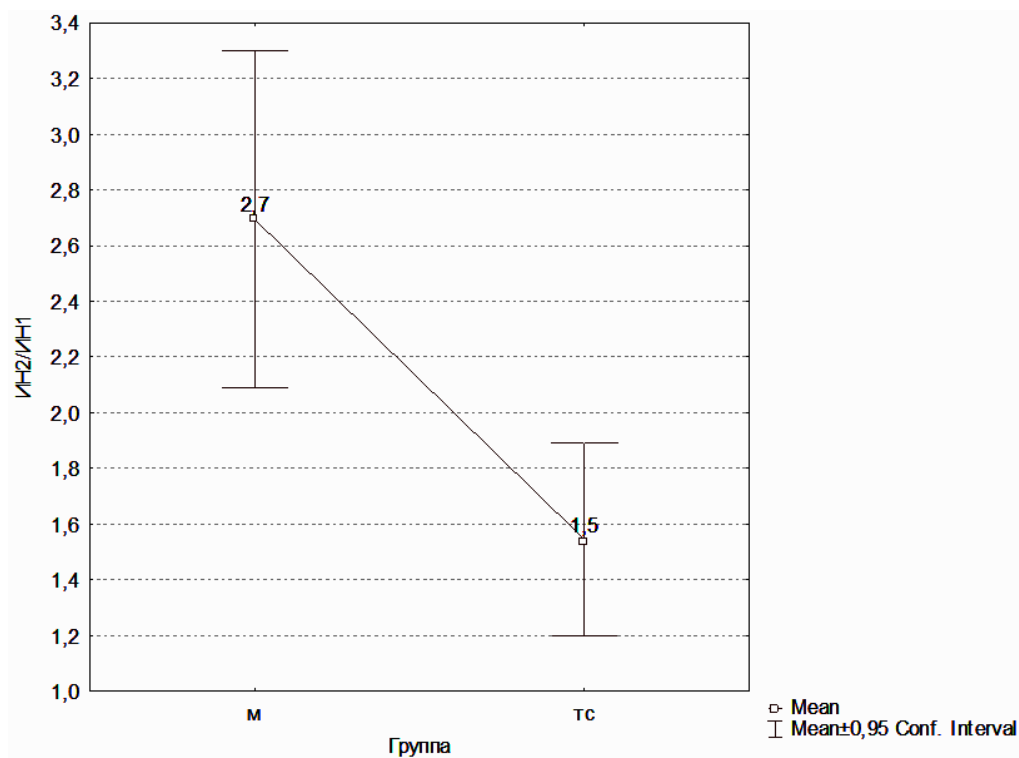


Рис. 2. Сравнение средних значений индекса ИИ2/ИИ1 в двух группах, где М – группа больных мезотимпанитом без тимпаносклероза, а ТС – группа пациентов с тимпаносклерозом

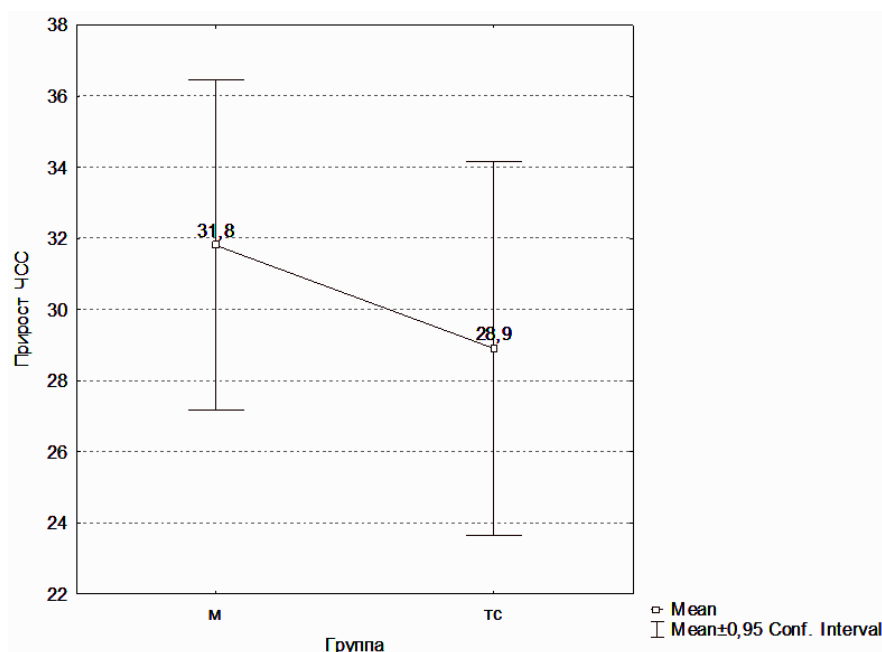


Рис. 3. Сравнение средних значений прироста ЧСС в ортостатической пробе в двух группах, где М – группа больных мезотимпанитом без тимпаносклероза, а ТС – группа пациентов с тимпаносклерозом

На 6 диаграммах, размещенных в табл. 4, представлено графическое изображение показателей ВТ, ВР и ВОД в обеих группах обследованных больных. На круговых диаграммах хорошо видно, что структура вариантов ВТ и ВР у больных с тимпаносклерозом и мезотимпанитом без тимпаносклероза имеют существенные различия, а ВОД практически не различается. Однако и в одной, и в другой группе адекватное ВОД зафиксировано только в небольшом количестве наблюдений. У остальных больных этот показатель отражает наличие нейровегетативной дисфункции.

Для сравнения долей отдельных вариантов показателей функционального состояния ВНС в обеих исследуемых группах был использован критерий Хи-квадрат Пирсона.

При сравнении распределения вариантов вегетативного тонуса между группой больных тимпаносклерозом и мезотимпанитом без тимпаносклероза обнаружено их статистически значимое различие (Pearson Chi-square = 11,52473; df = 2, $p < 0,05$). При этом у большинства больных обеих групп зафиксирована нейровегетативная дистония – ВТ был сниженным или повышенным (диаграмма 1). У пациентов с тимпаносклерозом отмечено преобладание повышенного ВТ (41,7 % случаев), а у пациентов с мезотимпанитом без тимпаносклероза – сниженного ВТ (46 %).

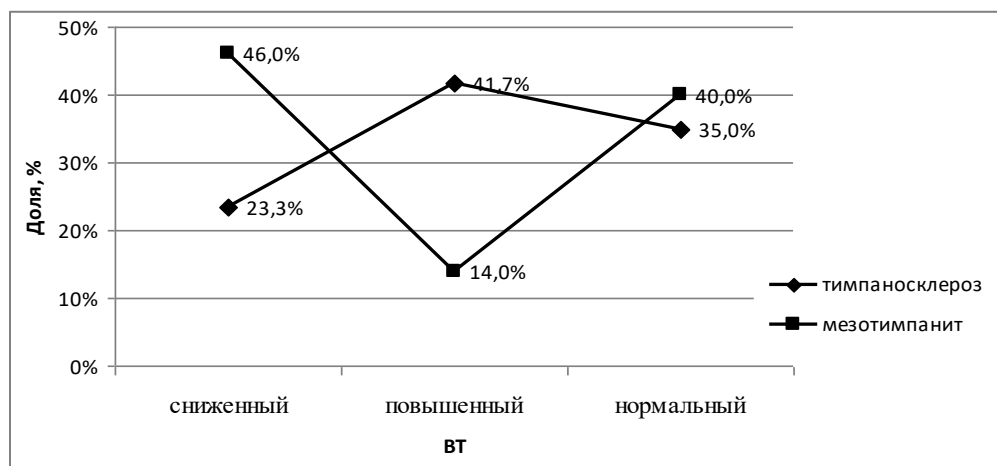


Диаграмма 1. Распределение вариантов ВТ в обеих группах

При сравнении распределения вариантов вегетативной реакции между группой больных тимпаносклерозом и мезотимпанитом без тимпаносклероза (диаграмма 2) обнаружено их статистически значимое различие (Pearson Chi-square = 6,540926; df = 2, $p < 0,05$). В группе наблюдения ВР была повышена в 41,7 %, снижена – в 35 %, а в группе сравнения – 38 % и 18 % соответственно.

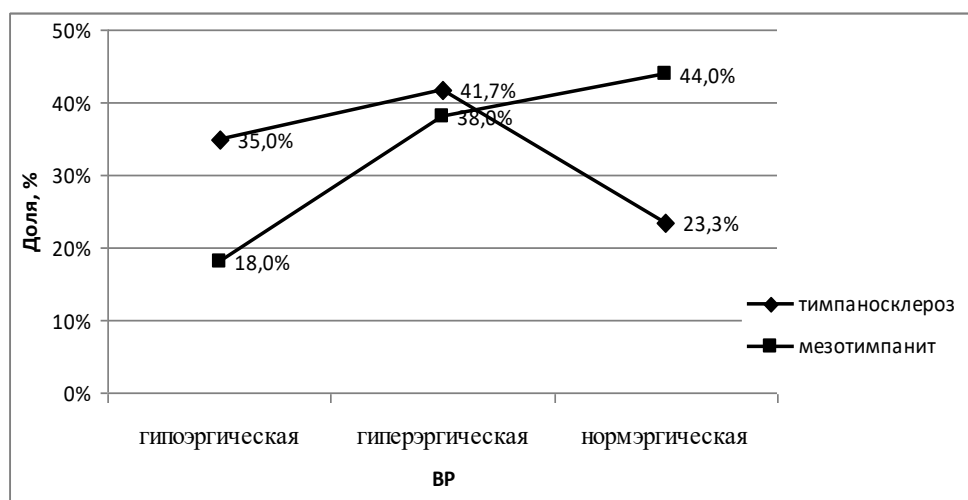


Диаграмма 2. Распределение вариантов ВР в обеих группах

При сравнении распределения вариантов вегетативного обеспечения деятельности между группой больных тимпаносклерозом и мезотимпанитом без тимпаносклероза (диаграмма 3) статистически значимого различия не обнаружено (Pearson Chi-square = 0,6252137; df = 2, $p > 0,05$). Как в группе наблюдения, так и в группе сравнения зафиксировано недостаточное ВОД почти в половине случаев, несмотря на повышенный ВТ при тимпаносклерозе, и весьма часто отмечаемую гиперреактивность в обеих группах. Адекватное ВОД выявлено лишь в 13,3 % случаев в группе наблюдения и 16 % случаев в группе сравнения. У остальных больных ВОД было избыточным (диаграмма 3).

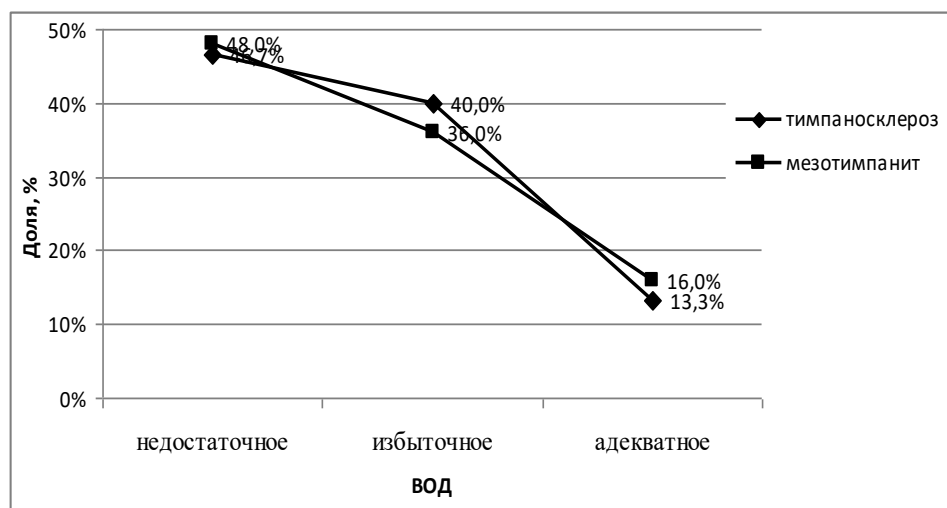


Диаграмма 3. Распределение вариантов ВОД в обеих группах

Избыточное ВОД у 40 % пациентов с тимпаносклерозом и 36 % пациентов с мезотимпанитом без тимпаносклероза отражает состояние напряжения защитных систем организма, связанное с патологическими процессами, протекающими в среднем ухе. Недостаточное ВОД в обеих обследуемых группах (48 % случаев в группе наблюдения и 48,7 % – в группе сравнения) указывает на истощение защитных и компенсаторно-приспособительных ресурсов организма, необходимых для противодействия этим процессам.

В патологогистологических описаниях операционного материала, полученного у больных из группы наблюдения, указаны признаки склеротических изменений с явлениями гиалиноза и кальциноза. Отмечен очаговый характер лимфоидно-плазмоцитарных инфильтратов, которые локализуются между полями склероза. В ряде случаев гистологическое исследование очагов тимпаносклероза, располагавшихся на границе перфорации барабанной перепонки, показало, что эпидермис, покрывающий наружную поверхность тимпаносклеротического очага, переходил через свободный край и обнаруживался на внутренней, обращенной в барабанную полость, поверхности.

Гистохимический анализ препаратов слизистой оболочки показал, что у больных с недостаточным ВОД, даже при повышенном общем ВТ, адренергические нервные волокна обладали слабой люминесценцией как в области межварикозных пространств, так и в области варикозных расширений, представляющих собой синаптические окончания, из которых выделяется нейромедиатор. Мелкие варикозные расширения располагались вдоль волокон на большом расстоянии друг от друга, интенсивность люминесценции варикозных расширений и межварикозных пространств практически не различалась, что подтверждает низкую функциональную активность периферических адренергических нервных волокон, локализованных в собственной пластинке слизистой оболочки барабанной полости среднего уха. У больных с избыточным ВОД периферические адренергические волокна выглядели иначе. Крупные, часто расположенные варикозные расширения интенсивно люминесцировали, в то время как межварикозные пространства были почти не видны. Это указывает на возможность усиленного выброса нейромедиатора из синаптических окончаний в ответ на любое возмущающее воздействие и резкое истощение его резервных запасов в гранулах хранения. Полученные данные об активности периферических адренергических нервных волокон в слизистой оболочке среднего уха соответствуют клинко-физиологическим результатам исследования функционального состояния ВНС и свидетельствуют об участии нейровегетативных регуляторных механизмов в патогенезе тимпаносклероза.

В литературе, посвященной гистологической характеристике тимпаносклероза, представлены данные, аналогичные собственным результатам. Большинство авторов отмечает, что при микроскопическом исследовании операционного материала, содержащего участки слизистой оболочки, попадающей в поля зрения вместе с удалёнными тимпаносклеротическими бляшками, присутствуют признаки хронического вялотекущего воспаления с преобладанием склеротических изменений. На этом основании тимпаносклероз считают особой формой склероза слизистой оболочки среднего уха, которая проявляется в виде плотных утолщений, образованных грубоволокнистым коллагеном с явлениями гиалиноза и дистрофического обызвествления [18]. Дистрофическое обызвествление – это выпадение солей кальция в местах некроза или глубокого дистрофического изменения тканевых структур. Соли кальция инкрустируют основное вещество или коллагеновые и эластические волокна соединительной ткани [17]. В большинстве случаев гиалиноз является необратимым структурным изменением соединительной ткани, хотя его физиологическое значение бывает различным в зависимости от распространённости и степени выраженности. С одной стороны гиалиноз может быть обычной физиологической компенсаторно-приспособительной реакцией на повреждение соединительнотканых образований: собственной пластинки слизистой оболочки, надкостницы или самой кости, возникающее в результате хронического воспаления. С другой стороны выраженный и распространённый гиалиноз с петрификацией, ведущий к значительным функциональным нарушениям и тяжёлым последствиям, становится патологическим склеротическим процессом и требует хирургического лечения [17].

Результаты патологогистологических исследований, представленные в специальной литературе, показали, что в тканях, испытывающих дефицит нервно-трофических симпатических влияний, или, напротив, получающих перманентное раздражение вследствие импуль-

сов, возникающих в ВНС под влиянием внешних и внутренних раздражителей, развиваются нейродистрофические морфологические изменения, в основе которых лежат разнообразные общепатологические процессы: альтерация вплоть до некроза, атрофические и вазопаралитические расстройства, нарушения пролиферации и дифференцировки тканевых структурных элементов. Нейродистрофии обуславливают пониженную сопротивляемость ткани и часто становятся благодатной почвой для развития микробной инфекции. При этом хроническое воспаление может представлять собой вторичное явление, имеющее важное значение для расширения зоны уже возникших изменений [22].

Экспериментальные исследования реактивности соединительной ткани в месте повреждения на модели раневого дефекта свидетельствуют о ведущей роли ВНС в механизмах репаративной регенерации. Раздражение вегетативных центров сопровождается резким угнетением макрофагальной и фибробластической реакций, нарушением процессов волокнообразования. Отсутствие вегетативных импульсов приводит к иным результатам: отмечается неравномерная пролиферация соединительной ткани, плотные гиалинизированные участки чередуются с участками рыхлого строения, нарушается метаболизм соединительнотканых элементов. В макрофагах и фибробластах снижается синтез белка и кислых полисахаридов, ослабляется и извращается коллагеногенез, многие коллагеновые волокна подвергаются деструкции, происходит быстрая и преждевременная дифференцировка развивающейся в месте повреждения соединительной ткани. Опыты с блокировкой нервных импульсов гексонием в н-холинергической системе вегетативных ганглиев и дигидроэрготоксином в периферических адренергических волокнах вызывают такие же нарушения репаративной регенерации, как и повреждение вегетативных центров. В итоге проведенных исследований констатировано, что необходимым условием для нормального хода соединительнотканной реакции в очагах повреждения является интактность периферической вегетативной иннервации, в частности, н-холинергических и адренергических нервных волокон [2]. Вместе с тем трофическое состояние иннервируемой ткани определяется, в основном, импульсами, поступающими по симпатическим (адренергическим) путям и, зачастую, превращающими регуляторные механизмы в механизмы нейродистрофических расстройств, приводящих к глубоким деструктивным изменениям в тканях. Усиленный выброс адренергических медиаторов при воздействии даже слабых или умеренных раздражителей и последующее сокращение их запасов в гранулах хранения определяют состояние напряжения, а затем и истощения симпатического отдела ВНС, вплоть до временной «симпатэктомии». Таким образом, нарушения в деятельности ВНС могут иметь двухфазный характер [9]. В остром периоде вегетативный гипертонус и избыточное ВОД обуславливают нейродистрофии, связанные с повышенной функциональной активностью вегетативных центров и проявляющиеся в виде катаболического синдрома (спазм артериол с ухудшением питания тканей, усиление распада белков и азотемия, длительная гипертермия). Каждый из этих факторов усугубляет действие других повреждающих агентов, что и приводит к бурному развитию дистрофий [6]. В связи с этим катаболический синдром в остром периоде воспаления или при обострении хронического процесса в слизистой оболочке среднего уха требует применения препаратов адренолитического действия на фоне общей комплексной терапии. На стадии репарации, напротив, важно учитывать наличие арективного синдрома, развивающегося при недостаточном ВОД. Это состояние характеризуется ослаблением нейровегетативной регуляции восстановительных процессов и поливалентной гормональной недостаточностью. Конкретными проявлениями арективного синдрома являются длительная стойкая артериальная гипотония в сочетании с гипотермией, нарушения гемодинамики в виде пареза кровеносных сосудов и усиления сосудистотканевой проницаемости, а также повышение активности микрофлоры, в том числе патогенных микроорганизмов [6]. В таких случаях в качестве вторичной профилактики целесообразно не подавлять симпатическую медиацию, а, в дополнение к основному лечению, вос-

полнять запасы медиатора – норадреналина, содействуя нормализации трофической функции ВНС с помощью адреномиметических средств.

Полученные данные свидетельствуют о необходимости учитывать функциональную активность ВНС у больных тимпаносклерозом и дополнять хирургическое лечение терапевтическими мероприятиями, направленными на коррекцию нейровегетативных расстройств.

На современном этапе для нормализации вегетативных функций у больных с патологией ЛОР-органов успешно используются физиотерапевтические процедуры (транскраниальное электровоздействие) и лекарственные препараты [11, 12]. Медикаментозное лечение включает применение психофармакологических средств – транквилизаторов и антидепрессантов, а также вегетотропных препаратов, различающихся по уровню (центральные и периферические) и характеру приложения (холинергетики и холиномиметики, α - и β -адреноблокаторы и адреномиметики) [8]. При этом медикаментозная коррекция вегетативных расстройств не играет ведущей роли и не является терапией выбора, однако она способствует повышению эффективности традиционных способов лечения больных.

Литература

1. Ажипа А.Я. Трофическая функция нервной системы. – М.: Наука, 1990. – 672 с.
2. Арэнд Ю.Э. О центральной регуляции реактивности соединительной ткани и состояния паренхимы в печени // Проблема нейродистрофий внутренних органов центрального происхождения: материалы конференции. – Л., 1972. – С. 9–10.
3. Баевский Р.М. Прогнозирование состояний на грани нормы и патологии. – М.: Медицина, 1976. – 298 с.
4. Баевский Р.М., Кириллов О.И., Клецкин С.З. Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе. – М.: Наука, 1984. – 221 с.
5. Белоконь Н.А., Кубергер М.Б. Болезни сердца и сосудов у детей: руководство для врачей. В 2-х. т. – Т. 1. – М.: Медицина, 1987. – 448 с.
6. Борщаговский М.Л., Дубикайтис Ю.С. Трофические нарушения при острых поражениях головного мозга (операционной и неоперационной травме) // Проблема нейродистрофий внутренних органов центрального происхождения: материалы конференции. – Л., 1972. – С. 57–59.
7. Вандышев А.М. Нейро-вегетативный компонент патогенеза хронического гнойного среднего отита (клинико-экспериментальное исследование): автореф. дис. ... канд. мед. наук. – СПб., 2001. – 33 с.
8. Вегетативные расстройства: клиника, лечение, диагностика / под ред. А.М. Вейна. – М., 2000. – 752 с.
9. Заводская И.С., Морева Е.В., Новикова Н.А. Влияние нейротропных средств на нейрогенные поражения сердца – М.: Медицина, 1977. – 192 с.
10. Захаренкова Т.И. Морфогистохимическая характеристика тимпаносклероза и некоторые вопросы его морфогенеза. // Архив патологии. – 1982. – №1. – С. 39–44.
11. Юрков А.Ю. и др. Лечение нейровегетативных расстройств у больных с дисфониями // Актуальные вопросы логопатологии: материалы конференции логопедов. – СПб, 2009. – С. 62–63.
12. Лопатин Б.С. Характеристика хронического очага инфекции в среднем ухе и принципы его лечения. Патология органа слуха. – М., 1980. – С. 65–68.
13. Науменко Н.Н. и др. Нейровегетативная составляющая патогенеза заболеваний верхних дыхательных путей // Рос. оторинолар. – 2004. – № 1 (8). – С. 13–17.
14. Овчинников Ю.М. О роли и месте тимпаносклероза (отоза) в патологии среднего уха // Вестн. оторинолар. – 1975. – № 2. – С. 17–22.
15. Саркисов Д.С. Структурные основы адаптации и компенсации нарушенных функций: руководство. АМН СССР. – М.: Медицина, 1987. – 448 с.

16. Струков А.И. Патологическая анатомия. – М.: Медицина, 1971. – 600 с.
17. Струков А.И., Серов В.П. Патологическая анатомия. – М.: Медицина, 1985. – 649 с.
18. Тарасов Д. И., Федорова О.К., Быкова В.П. Заболевания среднего уха. М.: Медицина, 1988. – 288 с.
19. Сагалович Б.М. и др. Тугоухость / под ред. Н.А. Преображенского – М.: Медицина, 1978. – 440 с.
20. Урюпин В.К., Бычков О.В. Некоторые особенности клиники тимпаносклероза // Вестн. оторинолар. – 2000. – № 1. – С. 34 – 35.
21. Борисова К.З. и др. Фиброзирующие формы хронических средних отитов по материалам отделения микрохирургии уха областного сурдологического центра // Материалы XVI съезда оториноларингологов РФ. Оториноларингология на рубеже тысячелетия. – СПб., 2001. – С. 46–49.
22. Чайка Т.В. Морфологические основы висцеральных нарушений нейрогенного гипоталамического происхождения // Проблема нейродистрофий внутренних органов центрального происхождения: мат. конф. – Л., 1972. – С. 47–49.
23. Bloom F., Battenberg E.L.F. A rapid simple and sensitive method for the demonstration of central catecholamine-containing neurons and axones by glyoxylic acid induced fluorescence II. A detailed description of methodology // Histochem. Cytochem. – 1976. – Vol. 24, № 4. – P. 561–571.
24. Sprem N. et al. Experimental hematomatympanum – aspects to the tympanosclerosis development // Coll Antropol. – 2002. – Vol. 26, № 1. – P. 267–272.
25. Friedmann I., Galey F.R. Initiation and stages of mineralization in tympanosclerosis // J. Laryngol. Otol. – 1980. – Vol. 94, № 11. – P.1215–1229.
26. Moller P. Tympanosclerosis of the ear drum. A scanning electronmicroscopic study // *Acta Otolaryngol.* – 1981. – Vol. 91, № 3–4. – P. 215–221.
27. Russel J.D., Giles J.J. Tympanosclerosis in the Rat Tympanic Membrane: An Experimental Study // Laryngoscope. – 2002. – Vol. 112, № 9. – P. 1663–1666.
28. Sheehy J.S., House W.F. Tympanosclerosis // Archives of Otorhinolaryngology. – 1962. – Vol. 76. – P. 151–157.
29. Asiri S. et al. Tympanosclerosis: review of literature and incidence among patients with middle-ear infection // *J. Laryngol. Otol.* – 1999. – Vol. 113, № 12. – P. 1076–1080.
30. Waris T., Rechardt Z. A rapid method for the demonstration of cutaneous catecholamines in cryostat section with glyoxylic-acid-induced fluorescence // *Acta Anat.* – 1977. – Vol. 99, № 3. – P. 323–324.

СОДЕРЖАНИЕ

А.Д. Менишиков

Лондонского королевское общество 3

В.В. Иванов

Целесообразность человека 9

*М.Т. Левшенко*Туринская плащаница – решение найдено:
«Солнечный» механизм формирования «изображения» 33*В.Б. Молодкин, М.В. Ковальчук, В.Ф. Мачулин, Э.Х. Мухамеджанов,**А.И. Низкова, С.В. Лизунова, С.И. Олиховский, Е.Г. Лень,**Б.В. Шелудченко, С. В. Дмитриев, Е.С. Скакунова, В.В. Молодкин,**В.В. Лизунов, А.А. Катасонов, И.Н. Заболотный,**В.П. Кладько, Б.С. Карамурзов, Т.И.Оранова, Ю.П.Хапачев*Диагностика структуры новейших кристаллических материалов
и многослойных изделий нанотехнологий с неоднородно
распределенными макродеформациями и микродефектами
нескольких типов 50*А.И. Липкин*

Пространство, время и теория относительности 107

И.И. Чернушевич, Т.И. Шустова, А.Ю. Юрков

Роль вегетативной нервной системы в патогенезе тимпаносклероза 115

CONTENTS

<i>A.D. Menshikov</i> The Royal Society of London	3
<i>V.V. Ivanov</i> Expediency of human	9
<i>M.T. Levshenko</i> The Shroud of Turin – the decision is found: «The solar rays» mechanism of formation of «The image»	33
<i>V.B. Molodkin, M.V. Kovalchuk, V.F. Machulin, E.Kh. Mykhamedjanov,</i> <i>A.I. Nizkova, S.V. Lizunova, S.I. Olikhovskii, E.G. Len,</i> <i>B.V. Sheludchenko, S.V. Dmitriev, E.S. Skakunova, V.V. Molodkin,</i> <i>V.V. Lizunov, A.A. Katasonov, I.N. Zabolotny, V.P. Kladko,</i> <i>B.S. Karamurzov, T.I. Oranova, Yu.P. Khapachev</i> Diagnostics of the structure of crystalline materials newest and nanotechnology multilayer products with inhomogeneous distribution of macrodeformations and microdefects of several types	50
<i>A.I. Lipkin</i> Space, time and relativity theory	107
<i>I.I. Chernushevich, T.I. Shustova, A.Yu. Yurkov</i> Clinical and morphological characteristics of tympanosclerosis in patients with neurovegetative disorders	115

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция просит авторов руководствоваться изложенными ниже правилами

1. Статья, предоставленная для публикации, должна иметь направление экспертное заключение от учреждения, в котором выполнена работа.
2. Рукопись должна быть отпечатана на компьютере или машинке (размер шрифта – 12 кегль) через два машинописных интервала (полуторный межстрочный интервал в редакторе Word), на белой бумаге формата А4 (297х210 мм) с одной стороны листа, левое поле – 25 мм. Все листы в статье должны быть пронумерованы.
3. Статья должна быть подписана авторами и представлена в двух экземплярах.
4. Рисунки, таблицы и фотографии в текст рукописи не размещаются, а прилагаются на отдельных листах в конце статьи.
5. Начало статьи оформляется по образцу: индекс статьи по универсальной десятичной классификации (УДК), название, авторы, полное название учреждений, в которых выполнялось исследование, краткая аннотация (объем – не более половины страницы), текст статьи. Далее на отдельных листах:
 - список литературы,
 - таблицы,
 - рисунки,
 - подписи к рисункам,
 - на английском языке: название, авторы, полное название учреждений, в которых выполнялось исследование, краткая аннотация,
 - адреса для переписки, телефоны, fax, e-mail.
6. В статье должны использоваться единицы и обозначения в международной системе единиц СИ и относительные атомные массы элементов по шкале ¹²С. В расчетных работах необходимо указывать авторов используемых программ. При названии различных соединений необходимо использовать терминологию ИЮПАК.
7. Все сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.
8. При упоминании в тексте иностранных фамилий в скобках необходимо давать их оригинальное написание, за исключением общеизвестных, а также в случае, если на эти фамилии даются ссылки в списке литературы.
9. При упоминании иностранных учебных заведений, фирм, фирменных продуктов и т.д. в скобках должны быть даны их названия в оригинальном написании.
10. Оформление формул должно соответствовать следующим требованиям.
 - a. Все формулы и буквенные обозначения должны быть напечатаны на компьютере, или впечатаны на машинке с латинским шрифтом, или вписаны от руки черными чернилами, с четкой разметкой всех особенностей текста (индексов, полужирного и курсивного начертаний и т.д.).
 - b. При разметке формул необходимо прописные и строчные буквы всех алфавитов, имеющих одинаковое начертание (P, S) подчеркивать простым карандашом: большие – двумя чертами снизу, маленькие – двумя чертами сверху.
 - c. Показатели степени и индексы выделять простым карандашом дугой: верхние – снизу, нижние – сверху.
 - d. Для полужирных символов (векторов) использовать подчеркивание синим карандашом.
11. Таблицы нумеруются по порядку упоминания их в тексте арабскими цифрами. После номера должно следовать название таблицы. Все графы в таблицах и сами таблицы должны иметь заголовки.

12. Рисунки предоставляются размером не менее 5х6 см и не более 17х24 см, с указанием низа и верха. Рисунки должны быть выполнены на белой бумаге черной тушью или распечатаны на лазерном или струйном принтере качеством не менее 300 dpi. Использовать другие цвета кроме черного не допускается.

13. Фотографии предоставляются на не тисненной глянцевой бумаге размером не более 9х12 см.

14. На обратной стороне рисунков и фотографий указывают фамилию первого автора, порядковый номер, верх, низ.

15. В тексте необходимо дать ссылки на все приводимые рисунки и таблицы, на полях рукописи слева должно быть отмечено, где приводимый рисунок или таблица встречаются впервые.

Требования к рукописям, предоставляемым в электронном виде

1. В целях сокращения сроков подготовки материалов к публикации желательно предоставление материалов в электронном виде. Электронная версия материалов сдается в дополнение к бумажной и должна быть максимально ей идентична.

2. Электронная версия предоставляется электронной почтой (avse@kbsu.ru), или на 3,5» дискетах, форматированных для IBM PC, либо на CD- или DVD-дисках. На диске должны быть обозначены имена файлов, название статьи и фамилия и инициалы автора(ов).

3. Основной текст статьи и таблицы предоставляются в формате MS Word for Windows (версии 6.0 и старше). Шрифт – Times New Roman, 12 кегль. Строки в пределах абзаца не должны разделяться тем же символом, что и абзацы.

4. Формулы, если это необходимо, должны быть набраны в формате MS Equation. Как в тексте, так и в MS Equation следует соблюдать следующие стили и размеры:

- a. Стил: текст, функция, числа – Times New Roman Обычный, переменная – Times New Roman Наклонный (Курсив), матрица-вектор Times New Roman Полужирный, греческие и символы – Symbol Обычный.
- b. Размер: обычный, мелкий символ – 12 пт, крупный индекс – 8 пт, мелкий индекс – 6 пт, крупный символ – 18 пт.
- c. Формат–интервал: высота/глубина индексов – 30 %, все остальное – по умолчанию.
- d. В числах следует использовать десятичную запятую, а не точку.

5. Штриховые и полутоновые иллюстрации должны быть представлены в форматах TIFF, JPEG, GIF с разрешением не менее 300 dpi. Цветовая палитра: grayscale. Каждый графический файл должен содержать один рисунок.

6. Допускается сжатие графических файлов архиваторами WinRAR или WinZIP. Каждый файл должен быть помещен в отдельный архив.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ
СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ**

В печать 28.09.2012. Формат 60х84 ¹/₈.
Печать трафаретная. Бумага газетная. 15.34 усл.п.л. 15.0 уч.-изд.л
Тираж 1001 экз. Заказ № _____.
Кабардино-Балкарский государственный университет.
360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173.

Полиграфический участок ИПЦ КБГУ.
360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173.