

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКPERSONALIA

53 (092)

ПАМЯТИ СОЛОМОНА БОРИСОВИЧА ПИКЕЛЬНЕРА

19 ноября 1975 г. трагически оборвалась жизнь выдающегося астрофизика, доктора физико-математических наук, профессора Московского университета Соломона Борисовича Пикельнера.

С. Б. Пикельнер родился 6 февраля 1921 г. в Баку. Отец его был счетоводом, мать — фельдшером. Отец умер, когда мальчику было 11 лет, и мать с ним и его младшим братом переехала в Тулу. Здесь С. Б. Пикельнер в 1938 г. с отличием окончил школу и без экзаменов был принят на механико-математический факультет МГУ. Уже с первого курса он начал с энтузиазмом заниматься научной работой в Астрономо-геодезическом обществе (итогом чего были две студенческие работы).

После окончания МГУ в 1942 г. С. Б. Пикельнер поступил в аспирантуру и в 1946 г. защитил кандидатскую диссертацию «О выбросе атомов из Солнца и звезд давлением радиации».

С 1945 г. он работал младшим научным сотрудником Астрофизической комиссии АН СССР, подготовившей восстановление разрушенной войной Крымской обсерватории. В 1946 г. С. Б. Пикельнер стал сотрудником этой обсерватории. Здесь у него возник и остался уже на всю жизнь определяющим глубокий интерес к проблемам физики Солнца. По-видимому, нет такого принципиального вопроса физики солнечной атмосферы, в решение которого С. Б. Пикельнер не внес бы значительный вклад.

Уже в первых работах, рассматривая диссипацию атомов из звездных атмосфер, С. Б. Пикельнер пришел к выводу о существовании звездных коронок, температура которых определяется гравитационным потенциалом на поверхности звезды, а плотность в их основании зависит от мощности негравитационного механизма нагрева. Высказанные им идеи спустя многие годы нашли законченное воплощение в теории солнечного ветра, причем ранее вычисленный С. Б. Пикельнером поток диссипирующих из Солнца частиц оказался близким к его современной оценке.

Большое место в крымском периоде жизни С. Б. Пикельнера заняла совместная работа с выдающимся советским астрофизиком Г. А. Шайном, оказавшим на Соломона Борисовича огромное научное и человеческое влияние. Отсюда берет свои истоки вторая определяющая линия в научной деятельности С. Б. Пикельнера — физика туманностей и межзвездного газа.

Начав с систематических наблюдений галактических туманностей на небулярном спектрографе, этом чрезвычайно капризном и трудном для наблюдений инструменте, С. Б. Пикельнер проявил себя как весьма искусный и тонкий экспериментатор и наблюдатель. Он смог «выжать» с помощью этого инструмента буквально невозможное. Достаточно сказать, что некоторые особенности свечения туманностей, отмеченные тогда С. Б. Пикельнером, были лишь несколько лет назад исследованы в США на трехметровом рефлекторе.

Параллельно с этими работами С. Б. Пикельнер начал теоретическое изучение физических условий в межзвездной среде. Анализируя вопрос об удержании в Галактике космических лучей, он в 1951 г. первым выдвинул идею о существовании галактического гало — протяженного квазисферического образования, заполненного магнитными полями и релятивистскими частицами. В дальнейшем им были оценены (из условия равновесия газа под действием давления поля и космических лучей) плотность газа, скорости движений и некоторые другие параметры гало. Концепция галактического гало инициировала множество дальнейших исследований и до сих пор играет важную роль, в частности, при разработке различных вариантов происхождения и распространения космических лучей.

В тот же период С. Б. Пикельнер построил теорию свечения в ударной волне, созданной расширяющейся оболочкой сверхновой звезды в межзвездном газе.

Он указал механизм образования волокнистой структуры (фокусировка фронта на флуктуациях плотности невозмущенного газа), рассчитал структуру волны и спектр ее излучения. Все эти вопросы составили содержание докторской диссертации С. Б. Пикельнера «Исследование движения и свечения межзвездного газа», защищенной в 1954 г.

В 1956 г. С. Б. Пикельнер разработал изящный метод оценки магнитного поля и энергии частиц в радиоисточниках — остатках сверхновых звезд. Предполагая, что релятивистские электроны Крабовидной туманности генерируются непрерывно (открытие там в 1968 г. пульсара блестяще подтвердило эту гипотезу), он рассчитал спектр излучения с учетом синхротронных потерь и уменьшения энергии частиц при расширении оболочки туманности. По излому в спектре оказалось возможным оценить напряженность поля. Этот метод нашел затем широкое применение в радиоастрономии для самых различных объектов. Весьма плодотворной оказалась и идея объяснить наблюдаемое ускорение оболочки молодого остатка сверхновой давлением магнитного поля и релятивистских частиц.

В 1959 г. С. Б. Пикельнер был по конкурсу зачислен профессором кафедры астрофизики МГУ и переехал в Москву. Середина творческого пути С. Б. Пикельнера совпадает со значительным изменением традиционного облика астрофизики. Одним из первых астрофизиков он осознал принципиальное значение физики плазмы и магнитной гидродинамики для понимания природы космических объектов. Современная астрофизика немыслима без использования этих фундаментальных областей физики, и именно работы С. Б. Пикельнера в значительной мере определили нынешнее состояние космической электродинамики и особенно физики солнечной плазмы. Одним из первых он понял важность бесстолкновительных ударных волн в астрофизических условиях. В 1965 г. им впервые была предложена теория солнечных всплесков II типа как излучения бесстолкновительных ударных волн, проходящих через солнечную атмосферу. Затем на основе магнитогидродинамики и плазменной астрофизики С. Б. Пикельнер последовательно объяснил основные закономерности солнечной активности.

Активные области Солнца характеризуются повышенной температурой верхних слоев фотосферы, повышенной плотностью хромосферы и короны и наличием магнитного поля, существенно более слабого, чем в пятнах. С. Б. Пикельнер нашел связь между этими свойствами. Он указал, что хотя поле недостаточно сильно, чтобы остановить конвекцию в основании хромосферы, оно достаточно велико, чтобы подавать турбулентную вязкость, сделав конвективные движения устойчивыми. В результате увеличивается скорость движений и усиливается генерация акустических и других волн, чем и объясняется аномальная яркость хромосферы и короны над факелами (флоккулы и корональные конденсации). Эта идея дала ключ к объяснению природы активных областей и стимулировала целый ряд дальнейших работ С. Б. Пикельнера и его учеников, а также других исследователей. В результате возникла стройная и физичная картина строения солнечной хромосферы, в которой различают тонкую структуру (многочисленные волокна) и спикулы, т. е. высокие плотные столбы газа, поднимающиеся со скоростью до 20 км/сек и потом исчезающие. Тонкую структуру С. Б. Пикельнер объяснил как результат выхода слабых магнитных полей в активных областях. Эти поля разделяются на отдельные трубки вследствие перестановочной неустойчивости, и в каждой трубке газ защищен от прогрева горячей короной, так как поле уменьшает теплопроводность поперек силовых линий. Поэтому хромосфера в трубке простирается высоко, а вне трубки кончается на малой высоте из-за прогрева. Такие волокна будут излучать, если они наблюдаются на краю, или поглощать, если они проектируются на диск Солнца. Именно это и наблюдается. Тем самым средняя хромосфера рассматривается как совокупность волокон, разделенных короной.

Образование спикул, согласно С. Б. Пикельнеру, обусловлено действием магнитных сил. Конвекция перемещивает силовые линии, и в отдельных местах линии противоположного направления подходят близко друг к другу. Там развивается ионно-звуковая турбулентность, линии перемыкаются, образуются магнитные петли, которые поднимают газ. Рассчитанная скорость подъема и напряженность поля согласуются с наблюдениями.

В этой картине нашли естественное объяснение и протуберанцы. В данном случае нужно понять появление плотного газа высоко в короне, на вершине арок магнитных силовых линий. С. Б. Пикельнер показал, что появление арки магнитного поля так изменяет тепловые условия в короне, что начинается поток газа из хромосферы в корону, а затем вдоль силовой линии в углубление на вершине арки, где газ уплотняется. Это и может соответствовать образованию плотного протуберанца. Непрерывное вытекание газа компенсируется просачиванием нейтральных атомов сквозь плазму вниз и развитием гидродинамических неустойчивостей.

⁴ Глубокое понимание плазменной физики, «отработанное» С. Б. Пикельнером при объяснении основных явлений солнечной активности, позволило ему участвовать и в разработке самой физической теории. Так, он внес вклад в создание одной

из первых схем лэнгмюровской турбулентности. В одной из последних работ, открывшей новый подход к объяснению хромосферных вспышек, С. Б. Пикельнер указал, что развитие плазменной турбулентности в токовом слое может быть источником ускорения частиц, наблюдаемых во вспышках. Решение им гидродинамической задачи о течении слоя хромосферной плазмы, в которую вторгается пучок ускоренных электронов, дало важный вклад в понимание вторичных эффектов при солнечных вспышках.

В середине 60-х годов С. Б. Пикельнер вернулся к анализу физических условий в межзвездном газе. Объяснение нагрева и ионизации межзвездного газа излучением звезд стало к этому времени классическим, казалось бы, завершенным разделом астрофизики. Между тем радионаблюдения не находились в согласии с устоявшимися моделями. Отправляясь от анализа этих наблюдений, С. Б. Пикельнер высказал радикальное предположение, что основным агентом ионизации газа вдали от звезд являются мягкие космические, или, как иногда говорят, субкосмические, лучи и, частично, мягкое рентгеновское излучение. Расчет нагрева и ионизации газа показал, что его давление зависит от плотности таким образом, что газ должен распадаться, вообще говоря, на две фазы: плотную холодную и разреженную горячую. Первая описывает межзвездные облака, в вторая — межоблачную среду. Эта работа изменила старую картину строения межзвездной среды, заставила пересмотреть все ее основные параметры: плотность, температуру, состояние ионизации и др. Были объяснены непонятные ранее наблюдения, например, поглощение в облаках низкочастотного радиоизлучения, отсутствие плотных облаков между рукавами Галактики и т. п. Новые представления о межзвездной среде, предложенные С. Б. Пикельнером, стали ныне общепризнанными и получили значительное развитие в работах многих авторов.

На основе нового понимания свойств межзвездной среды С. Б. Пикельнер обратился затем к проблеме образования звезд. Он рассмотрел ударную волну, возникающую в спиральных ветвях Галактики из-за относительного движения вращающихся вокруг центра газа и спиральной структуры. Были исследованы неустойчивости, которые приводят к фрагментации газа, его сжатию ударной волной и превращению в звезды. Оказалось, что накопление газа в больших комплексах, возникающих из-за неустойчивости Рэлея — Тейлора, создает плотные и холодные области, где происходит фрагментация уже из-за гравитационной неустойчивости. При этом могут образовываться и звезды малых масс, что было трудностью при прежних оценках, в которых не принималась во внимание возможность сильного охлаждения.

В последние годы жизни научные интересы С. Б. Пикельнера охватывали все новые и новые области. Вот далеко не полный перечень рассмотренных им вопросов: образование перемычек у спиральных галактик, астрофизический аспект кварков, происхождение магнитных звезд, наблюдательная космология.

С. Б. Пикельнер обладал умением построить «на пальцах» картину сложного астрофизического явления. Многие его идеи очень просты, почти очевидны, но эта «простота» — следствие четкости и глубокой физичности его мышления. Другое важное качество научного стиля С. Б. Пикельнера — поразительное умение объединить пеструю картину фактов в стройную схему, позволяющую объяснить эти факты с единой точки зрения.

За свою сравнительно короткую жизнь — он прожил неполных 55 лет — С. Б. Пикельнер написал не только около 150 научных работ и монографий по широкому кругу вопросов — от физики солнечной атмосферы до проблем галактической структуры и космогонии галактик, но и воспитал десятки учеников, ставших кандидатами и докторами наук. Он привлекал к себе гармоничным сочетанием высоких научных и человеческих качеств, так счастливо унаследованных им от своего учителя, Григория Абрамовича Шайна. «Г. А. Шайн был не только выдающимся ученым, — писал С. Б. Пикельнер, — но и замечательным человеком; исключительно скромный, отдавший науке всю свою жизнь, он был принципиален и строг в своих убеждениях, никогда не изменяя их и твердо следуя им в своих действиях». Эти слова в полной мере относятся и к самому Соломону Борисовичу, причем их нужно дополнить: там, где не затрагивались его принципиальные научные и человеческие убеждения, С. Б. Пикельнер был мягок, удивительно уступчив, великодушен и доброжелателен до самопожертвования. Естественно, что такое редкое сочетание научных и человеческих качеств буквально притягивало к нему людей.

Мировая научная общественность оценила большой вклад С. Б. Пикельнера в создание современной астрофизики. В частности, в марте 1971 г. он был избран иностранным членом Королевского Астрономического общества Англии. Он был президентом комиссии Международного Астрономического союза по межзвездной среде, членом комиссий МАС по магнитогидродинамике и физике ионизированных газов и комиссии МАС по межпланетной плазме и гелиосфере, членом и председателем оргкомитетов многих международных симпозиумов, членом редколлегий четырех международных журналов. Длительное время С. Б. Пикельнер был

председателем секции «Космическая плазма» Совета по плазме АН СССР, а также членом редколлегии журнала «Геомагнетизм и аэрономия». Невозможно в полной мере описать ту роль, которую он играл, будучи членом редколлегии и ответственным секретарем «Астрономического журнала».

Большую часть своего времени С. Б. Пикельнер отдавал преподаванию, читая основные астрофизические курсы в МГУ, руководил множеством студентов и аспирантов. Необыкновенная целеустремленность и поразительная способность использовать каждую свободную минуту позволила ему, вопреки своим многочисленным обязанностям, оставить глубокий след в науке.

Внезапная смерть застала С. Б. Пикельнера в расцвете духовных сил. Он был полон планов новых работ, статей, книг...

К счастью, очень многое С. Б. Пикельнер успел сделать и его общий вклад в астрофизику столь значителен, что имеет непреходящее значение. В благодарной памяти тех, кто лично знал Соломона Борисовича Пикельнера, навсегда останется и его образ исключительно отзывчивого, благородного и доброжелательного человека.

*В. Л. Гинзбург, Я. Б. Зельдович, Б. Б. Кадомцев,
Л. М. Озерной, Р. З. Сагдеев, С. И. Сыроватский,
В. Н. Цытович*

СПИСОК ОСНОВНЫХ НАУЧНЫХ ТРУДОВ С. Б. ПИКЕЛЬНЕРА

Книги

1. Физика межзвездной среды, М., Изд-во АН СССР, 1959, 216 стр. Дополненный англ. перевод: *Physics of Interstellar Space*, М., Изд. лит. на иностр. языках, 1961, 230 стр. Издано в США под названием *Soviet Science on Interstellar Space*, *Philosophical Library*, и в Англии издательством *Central Books, London*.
2. Основы космической электродинамики, М., Физматгиз, 1961, 395 стр. Переведено в США *Nat. Aeronaut. and Space Administration*, 1964. Второе изд., переработ. и дополн.: М., «Наука» 1966, 408 стр.
3. Солнце, М., Физматгиз, 1961, 84 стр. с илл.
4. Межзвездная среда, М., Физматгиз, 1963, 531 стр. (совместно с С. А. Капланом). Переведено в США *Harvard Univ. Press*, 1970.
5. Динамика солнечной плазмы, М., «Знание», 1974, 64 стр. (совместно с С. А. Капланом и В. Н. Цытовичем).
6. Физика плазмы солнечной атмосферы, М., «Наука» (в печати) (совместно с С. А. Капланом и В. Н. Цытовичем).

Статьи

1. Юпитер в 1929—1930 гг., Бюлл. ВАГО, № 4, 36—41 (1939).
2. Изменение в полосах Юпитера в 1929—1930 гг., в Сб. научных студенческих работ МГУ, вып. 18, М., 1941, стр. 122—125.
3. О выбросе атомов из Солнца и звезд давлением радиации, Вестн. Московск. ун-та, № 1, 131—137 (1946).
4. Давление радиации в звездных атмосферах, Астрон. ж. 24, 3—12 (1947).
5. Сопротивление движению атомов в звездных атмосферах в применении к звездам Вольф — Райе и к Солнцу, Изв. КрАО 3, 51—63 (1948).
6. Заряд хвоста кометы и его влияние на скорость расширения хвоста, Астрон. ж. 25, 299—305 (1948) (совместно с О. Н. Митропольской).
7. Диссипация короны и ее значение, ДАН СССР 72, 255—258 (1950).
8. К теории солнечной короны, Изв. КрАО 5, 34—58 (1950).
9. Тепловое радиоизлучение Солнца, *ibid.* 6, 29—44 (1951) (совместно с И. С. Шкловским).
10. Спектрогелиоскопические наблюдения в 1949 г., *ibid.*, стр. 179—187 (совместно с Е. Ф. Шапошниковой, К. К. Чуваевым и В. В. Сухановой).
11. Индукционные явления в солнечной атмосфере, *ibid.* 7, 99—112 (1951).
12. Наблюдения на спектрогелиоскопе в 1950 г., *ibid.* 8, 142—151 (1952) (совместно с Г. С. Ивановым-Холодным, И. И. Назаровой, В. В. Сухановой и В. Л. Хохловой).
13. Межзвездный газ и магнитные поля. *ibid.* 10, 74—96 (1953).
14. Кинематические свойства межзвездного газа в связи с изотропией космических лучей, ДАН СССР 88, 229—232 (1953).
15. Характер турбулентности в межзвездной среде, Изв. КрАО 97—103 (1953) (совместно с Г. А. Шайном).
16. Ионизация гелия в туманностях и температуры O-звезд, *ibid.*, стр. 183—199.

17. Возможный механизм свечения ночного неба в непрерывном спектре, ДАН СССР 88, 661—663 (1953) (совместно с К. К. Чуваевым).
18. Исследование турбулентности в туманности Ориона по флуктуациям яркости, *ibid.* 90, 741—744 (1953) (совместно с Г. А. Шайном).
19. Спектрофотометрическое исследование диффузной туманности NGC 7000, Изв. КрАО 11, 8—17 (1954).
20. Флуктуации яркости в туманности Ориона как возможное следствие турбулентности, *ibid.*, стр. 22—33 (совместно с Г. А. Шайном).
21. Метод исследования турбулентности по флуктуациям яркости в туманностях, *ibid.* стр. 34—38.
22. О вероятном механизме свечения ночного неба в непрерывном спектре, *ibid.*, стр. 178—184 (совместно с К. К. Чуваевым).
23. Электронный удар как один из возможных механизмов возбуждения красной линии ночного неба, *ibid.*, стр. 185—188.
24. Электромагнитные явления в астрофизике, Успехи астроном. наук 6, 281—322 (1954) (переведено отдельной брошюрой во Франции).
25. Некоторые результаты исследования наличия пыли и газа в диффузных туманностях, Астрон. ж. 31, 105—111 (1954) (совместно с Г. А. Шайном и В. Ф. Газе).
26. О наличии пыли и газа в диффузных туманностях, Изв. КрАО 12, 64—87 (1954) (совместно с Г. А. Шайном и В. Ф. Газе). См. также: Mem. Soc. Roy. Sci. Liège, ser. 4, 15, 444—453 (1955).
27. Магнитные поля в межзвездном пространстве, Вопросы космогонии 3, 85—93 (1954).
28. Физика туманностей и межзвездная среда, *ibid.*, стр. 317.
29. Спектрофотометрическое исследование механизма возбуждения волокнистых туманностей, Изв. КрАО 12, 93—118 (1954).
30. Исследование волокнистых туманностей, ДАН СССР 95, 1157—1160 (1954).
31. Магнитные поля в Галактике в связи с происхождением космических лучей, в кн. Труды III совещания по вопросам космогонии, М., Изд-во АН СССР, 1954, стр. 123—132.
32. Interstellar Light Polarisation and Magnetic Fields, Mem. Soc. Roy. Sci. Liège, ser. 4, 15, 595—600 (1955).
33. Отчет о наблюдении спектра короны 30 июня 1954 г., Изв. КрАО 13, 111 (1955).
34. О возможности оценки магнитного поля в Солнечной системе в связи с изучением движения вещества в газовых хвостах комет, Астрон. ж. 32, 45—47 (1955) (совместно с С. М. Полосковым).
35. Измерение поляризации Крабовидной туманности, *ibid.*, стр. 395—400 (совместно с Г. А. Шайном и Р. Н. Ихсановым).
36. К вопросу о механизме ускорения частиц в оболочках новых и сверхновых звезд, *ibid.*, стр. 503—513 (совместно с В. Л. Гинзбургом и И. С. Шкловским). Поправка: *ibid.* 33, 447 (1956).
37. Межзвездная поляризация света, УФН 68, 285—300 (1956).
38. К вопросу о спиральных движениях узлов протуберанцев, Астрон. ж. 33, 641—645 (1956).
39. К теории магнитных бурь и полярных сияний, Изв. КрАО 16, 104—121 (1956).
40. Динамика диффузной материи, *ibid.*, стр. 184—187.
41. Магнитное поле Крабовидной туманности и центральной звезды. Астрон. ж. 33, 785—799 (1956).
42. Электромагнитные явления в корпускулярных потоках, в кн. Физика солнечных корпускулярных потоков, М., Изд. АН СССР, 1957, стр. 105—110.
43. Исследования свойств и диссипации энергии газовой короны Галактики, Астрон. ж. 34, 145—158 (1957) (совместно с И. С. Шкловским).
44. Диссипация энергии, нагрев, ионизация ударными волнами межзвездного газа, *ibid.*, стр. 314—320.
45. On the Nature of Galactic Halo, Rev. Mod. Phys. 30, 935—937 (1958) (совместно с И. С. Шкловским) (имеется перевод в кн. Третий симпозиум по космической газодинамике, М., ИЛ, 1960, стр. 51—56).
46. О возможной анизотропии скоростей облаков межзвездного газа, Изв. КрАО 18, 198—201 (совместно с Л. П. Метик).
47. Основные понятия магнитогидродинамики, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 1, 46—53 (1958).
48. Some Effects Which Can Accompany Magnetic Storms, in: Electromagnetic Phenomena in Cosmical Physics (Symposium No. 6 of the IAU), Cambridge, Univ. Press, 1958, pp. 534—538.
49. О теориях «равновесного» происхождения элементов, Вопросы космогонии 7, 275—276 (1958).
50. On the Problem of the Nature of the Gas Corona of the Galaxy, Ann. d'Astrophys. 22, 913—925 (1959).

51. О возможных механизмах излучения дискретных галактических объектов в области 1225—1350 Å, *Астрон. ж.* **36**, 264—268 (1959) (совместно с И. С. Шкловским и Г. С. Ивановым-Холодным).
52. К вопросу о генетической связи звезд разных подсистем, *Изв. КраО* **21**, 209—214 (1959).
53. О возможности образования волокнистых структур скручиванием, *Астрон. ж.* **36**, 785—793 (1959) (совместно с Р. Е. Гершбергом).
54. Структура магнитогидродинамической ударной волны в частично ионизованном газе, *ЖЭТФ* **36**, 1536—1541 (1959).
55. О гравитационном затухании звука, *ibid.* **37**, 1827—1828.
56. К вопросу о происхождении внешнего радиационного пояса Земли, *Астрон. ж.* **36**, 1134 (1959).
57. О тонкой структуре внезапного начала магнитной бури, *Изв. КраО* **22**, 144—149 (1960) (совместно с А. С. Дворяшиным).
58. Механизм образования активных областей при наличии магнитного поля, *Астрон. ж.* **37**, 616—621 (1960).
59. Влияние космических лучей на характер магнитного поля и образование волокон в оболочках сверхновых, *ibid.*, **38**, 21—27 (1961).
60. По поводу статьи Ф. Хойла «Проблема источников радиоизлучения», *ibid.*, стр. 196—198 (совместно с И. С. Шкловским).
61. Образование уплотнений короны над активными областями, *ibid.*, стр. 243, 552—553.
62. Образование активных областей при наличии магнитного поля в кн. *Вопросы магнитной гидродинамики и динамики плазмы*, Рига, «Зинатне», 1962, стр. 243.
63. Космогония, в кн. *Физич. энцикл. словарь*, т. 2, М., «Сов. Энциклопедия», 1962, стр. 488—490 (совместно с В. С. Сафроновым).
64. Образование хромосферной сетки и структура магнитного поля, *Астрон. ж.* **39**, 973—976 (1962).
65. Анализ возможных механизмов образования магнитных полей в радиоисточниках, *ibid.* **40**, 601—611 (1963).
66. Диффузная среда и образование звезд и звездных систем, *Вопросы космогонии* **9**, 60—69 (1963).
67. О механизмах всплесков II типа радиоизлучения Солнца, *Астрон. ж.* **40**, 842—846 (1963) (совместно с М. А. Гинцбургом).
68. Диамагнитный выброс газовых сгустков из области солнечных пятен, *ibid.* **41**, 464—472 (1964) (совместно с М. А. Лившицем).
69. К теории нагрева активной и невозмущенной хромосферы, *ibid.*, стр. 1007—1020.
70. Спирали с перемычкой (SB) и образование спиральных ветвей, *ibid.* **42**, 3—18 (1965). См. также: *Nature* **207**, 393—394 (1965).
71. Спиральные ветви и взаимодействующие галактики, *Астрон. ж.* **42**, 515—526 (1965).
72. Межзвездная и межгалактическая среда, *Изв. АН СССР, сер. физ.* **29**, 1830—1837 (1965) (совместно с С. А. Капланом).
73. The Nature of the Active Regions of the Sun, *Vistas in Astronomy* **6**, 131—136 (1965).
74. Кварки: астрофизический и физико-химический аспекты, *УФН* **86**, 113—124 (1965) (совместно с Я. Б. Зельдовичем и Л. Б. Окунем). См. также: *Phys. Lett.* **17**, No. 1 (1965).
75. О возможности отождествления линий кваркоатомов в спектре Солнца, *Письма ЖЭТФ* **4**, 307—311 (1966) (совместно с Л. А. Вайнштейном).
76. Динамика солнечной атмосферы, *УФН* **88**, 505—526 (1966).
77. Радиоизлучение и строение атмосферы над пятнами, *Астрон. ж.* **43**, 1135—1142 (1966) (совместно с М. А. Лившицем и В. Н. Обридко).
78. Origin and Propagation of Cosmic Rays, *Trans. IAU* **A12**, 723—725 (1966).
79. Orion Nebula (Introductory Report), *ibid.* **B12**, 444—445 (1966).
80. Ионизация и нагрев межзвездного газа субкосмическими лучами. Образование облаков, *Астрон. ж.* **44**, 915—929 (1967). См. также: *Astrophys. Lett.* **1**, 43—46 (1967).
81. Structure and Dynamics of the Interstellar Medium, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* **6**, 165—194 (1967).
82. Interstellar Matter and Planetary Nebulae, *Trans. IAU* **A13**, 729—752 (1968).
83. X-ray Astronomy. Introduction, *Highlights of Astronomy*, 178—179 (1968).
84. Interaction of Stellar Wind with Diffuse Nebulae, *Astrophys. Lett.* **2**, 97—99 (1968).
85. Движение газа в диффузных туманностях и звездный ветер, *Астрон. ж.* **45**, 953—961 (1968) (совместно с П. В. Шегловым). См. также в кн. *Звезды, туманности, галактики*, Ереван, 1969, стр. 159—163.

86. Спектры высокочастотной турбулентности плазмы и ускорение субкосмических лучей, *ЖЭТФ* 55, 977—988 (1969) (совместно с В. Н. Цытовичем).
87. Космические лучи низкой энергии и плазменная турбулентность, *Астрон. ж.* 46, 8—19 (1969) (совместно с В. Н. Цытовичем).
88. Фазовое равновесие и динамика газа при объемном нагревании и охлаждении, *ЖЭТФ* 56, 310—315 (1969) (совместно с Я. Б. Зельдовичем).
89. Механизм образования хромосферных спикул, *Астрон. ж.* 46, 328—336 (1969).
90. Холодные области межзвездного газа и образование звездных ассоциаций, *ibid.* 47, 254—264 (1970). См. также: *Astrophys. and Space Sci.* 7, 489—493 (1970).
91. Lanes in Sc Galaxies Interpreted as Shock Waves in Spiral Arms, *Astrophys. Lett.* 7, 11—14 (1970).
92. Ударные волны в спиральных ветвях галактик Sc, *Астрон. ж.* 47, 752—759 (1970).
93. Образование протуберанцев, *ibid.* 48, 357—359 (1971). См. также: *Solar Phys.* 17, 44—49 (1971).
94. Магнитогидродинамика солнечных образований, *УФН* 103, 769—770 (1971).
95. Theory of Spicules and Chromospheric Structure, *Comm. Astroph. and Space Phys.* 3, 33—39 (1971).
96. Theory of Quiescent Prominences, *ibid.*, pp. 73—79.
97. Nature of the Fine Structure of the Middle Chromosphere, *Solar Phys.* 20, 286—294 (1971).
98. Magnetic Ap Stars, *Comm. Astrophys. and Space Phys.* 3, 190—197 (1971) (совместно с В. Л. Хохловой).
99. Природа тонкой структуры хромосферы, *Астрон. ж.* 48, 1212—1216 (1971).
100. Структура спиральных ветвей галактик и звездообразование, *УФН* 107, 153—155 (1972).
101. Магнитные звезды, *ibid.*, стр. 389—404 (совместно с В. Л. Хохловой).
102. Turbulence of solar plasma, *Comm. Astrophys. and Space Phys.* 4, 71—78 (1972) (совместно с С. А. Капланом и В. Н. Цытовичем).
103. UV Cet-type Flare Stars, *ibid.*, pp. 113—120 (совместно с Р. Е. Гершбергом).
104. Shock Waves in Spiral Arms and Star Formation, *ibid.*, pp. 129—136.
105. Origin of the Fluctuations of Density and of the Radial Filaments in Planetary Nebulse, *Astrophys. Lett.* 15, 91—96 (1973).
106. Флуктуации плотности и скорости в молодых туманностях типа Ориона, *Астрон. ж.* 50, 693—701 (1973) (совместно с Р. Л. Сороченко).
107. Stellar Wind and Related Phenomena in Surrounding Nebulae, *Comm. Astrophys. and Space Phys.* 5, 151—155 (1973).
108. Protuberanzen und magnetische Struktur der Chromosphäre, *Ideen des exakten Wissens*, Nr. 12, 748—755 (1973).
109. Large Scale Dynamics of the Interstellar Medium, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* 11, 113—133 (1974) (совместно с С. А. Капланом).
110. Природа точечных источников линейчатой, непрерывной и рентгеновской эмиссии на Солнце, *Астрон. ж.* 51, 233—242 (1974).
111. Газодинамика вспышечной области, прогреваемой потоком ускоренных электронов, *ibid.*, стр. 1002—1016 (совместно с Н. Д. Костюк).
112. Nucleogenesis, the Age of the Universe and the Young Galaxies, *Comm. Astrophys. and Space Phys.* 6, 15—25 (1974).
113. Plasma Physics of the Solar Atmosphere, *Phys. Rept.* C15, 1—82 (1974) (совместно с С. А. Капланом и В. Н. Цытовичем).
114. Флуктуации плотности межзвездной среды — причина различия «рентгеновских» и «доплеровских» скоростей остатков сверхновых, *Письма Астрон. ж.* 1, 29—34 (1975) (совместно с К. В. Бычковым).
115. Аннигиляция поля и ускорение частиц в солнечных вспышках, *Астрон. ж.* 52, 738—752 (1975) (совместно с В. Н. Цытовичем).
116. On the Models of Cosmic Masers, *Astrophys. and Space Sci.* (в печати) (совместно с В. С. Стрельницким).
117. К проблеме образования и эволюции шаровых скоплений, *Астрон. ж.* 52, 449—452 (1976).