

УДК 437.21:551.576

## МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ ОБЛАКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ АТМОСФЕРЫ В ПЕРИОДЫ АКТИВНОГО И СПОКОЙНОГО СОЛНЦА

Белый Тарас Анатольевич,  
belyit@gmail.com

Институт геофизики НАН Украины,  
03142, Украина, г. Киев, пр. Академика Палладина, 32.

**Актуальность.** В последнее десятилетие наблюдается стремительный рост регионального и глобального изменения климата в связи с хозяйственной деятельностью человека, которая в своих масштабах стала соизмерима с природными процессами. В качестве индикатора техногенной нагрузки может выступать электрическое поле атмосферы, так как техноэкономическая среда городов приводит к глобальным отклонениям и модификации естественных физических полей. Поэтому необходимость изучения влияния электрического поля атмосферы на распределение метеорологических параметров не вызывает сомнения, так как позволяет на качественном уровне проявить «тонкую» структуру стратификации атмосферы электрическим полем и ее изменение за счет антропогенного воздействия.

**Цель исследования:** рассмотреть морфологическую стратификацию облачных образований электрическим полем атмосферы в период активного и спокойного солнца. Данный подход позволяет на качественном уровне прояснить механизм изменения процессов конденсации водяного пара (на примере облаков) сменой солнечной активности, как уменьшение количества возбужденных молекул за счет разной ионизации атмосферы, а также построить физическую теорию антропогенной нагрузки от промышленных предприятий на атмосферу и климат.

**Объект исследования:** электрическое поле атмосферы, облака.

**Методика исследования** построена на детальном статистическом анализе по данным самолетного зондирования в период международного геофизического года и международного геофизического сотрудничества 1958–1964 гг.

**Результаты исследования.** Получены оценки радиационных сечений для молекул стандартной атмосферы и конденсированной фазы (облачные аэрозоли) в геометрическом приближении, которые показывают, что при характерном радиусе капель  $\bar{r}=10^{-3}$  см ионизация от конденсированной фазы соизмерима с фооновой ионизацией атмосферы. Приведена корреляционная зависимость средней водности облака и вертикального электрического поля. Анализ результатов показал, что среднегодовое распределение водности имеет высокую корреляцию со среднегодовым вертикальным распределением напряженности электрического поля для данного региона. Методами детального статистического анализа найдена взаимосвязь высоты образования облаков с электрическим полем атмосферы. Показано, что частота повторяемости нижней границы облаков совпадает с локальными точками равновесия плотности объемного заряда для этой же широты.

**Ключевые слова:**

Электрическая стратификация, облака, ионизация, солнечная активность, климат.

### Введение

Электрическое поле атмосферы (напряженность поля и его потенциал) существенно зависит от распределения проводимости атмосферы, а следовательно, метеорологических факторов: облака, осадки, запыление атмосферы, ионизация и т. д. В крупных промышленных центрах и мегаполисах создаются специфические вариации электрического поля атмосферы, имеющие антропогенную природу.

Вместе с тем широкое практическое использование данных атмосферного электричества в качестве индикатора техногенной нагрузки тормозится из-за недостатка информации о взаимосвязях электрических явлений с отдельными метеорологическими и геофизическими процессами, а также из-за сложности построения физической теории, объясняющей механизмы воздействия электрического поля на атмосферу в условиях ее промышленного загрязнения.

Как показывают теоретические расчеты и экспериментальные наблюдения, конденсация водяного пара в абсолютно чистом воздухе может происходить лишь в случае очень больших пересыщений. Причиной образования зародышевых капель

при отсутствии каких-либо примесей является флуктуация плотности водяного пара. Во время таких колебаний образуются комплексы молекул, которые в определенных условиях становятся устойчивыми и выступают зародышами капель воды [1].

С термодинамической точки зрения [2], образование облаков происходит в окрестности тройной точки конденсации (в электрически нейтральной среде), однако еще в работах [3, 4], а позже [5–7] показано, что в ионизированном воздухе конденсация пара возможна в ненасыщенном воздухе. Наличие электрического заряда того или иного знака на ядрах конденсации приводит к уменьшению равновесной упругости водяного пара, необходимой для образования на них капель. Влияние электрических зарядов тем больше, чем меньше радиус капель. Таким образом, формирование облаков на ядрах конденсации происходит не в электрически нейтральной среде, а на фоне процессов электрически активной поляризуемой подсистемы воздуха в форме коллективных ленгмюровских и ионно-звуковых колебаний. Инициаторами конденсации (ядрами конденсации) могут выступать возбужденная и ионная подсистемы атмосферы.

Для стандартной атмосферы барометрическое распределение не содержит наблюдаемую устойчивую стратификацию водяного пара с высотой. Независимые наблюдения [8] вертикального профиля  $H_2O$  разными методами показывают, что он сильно изрезан и представляет собой чередование слоев с характерной толщиной порядка одного километра. Так как глобальное распределение влаги в атмосфере главным образом представлено в виде молекул и комплексов  $(H_2O)_n$ , являющихся электроактивными [9], они будут существенно сильнее притягиваться электрическим полем и практически локализоваться в местах образования, создавая слои путем коллективизирования возбужденных молекул и электронов в флюид. Уменьшение подвижности и скейлинг межатомного взаимодействия обеспечивает механическую стабильность такой фазы за время жизни  $\tau$  метастабильного состояния возбужденных молекул ( $O_2^*$ ,  $N_2^*$ ,  $NO^*$ ,  $H_2O^*$ ) в тропосфере. Согласно работе [10],  $\tau$  варьирует от 12 до 140 с. Большое количество возбужденных поляризуемых частиц  $O_2(^1\Delta_g)$  в нижней стратосфере приводит к симбатной стратификации нижней стратосферы электрическим полем, что хорошо согласуется с данными [11], где экспериментально зарегистрированы страты ультрафиолетового излучения в области длин волн 1034–1118 Å.

Прямые ракетные измерения [12–14] вертикальной напряженности электрического поля показали, что электрическое поле свободной атмосферы на высотах 15–80 км совершает от пяти до десяти вертикальных колебаний каждые 2 км, сохраняя характерные экстремумы полного колебания поля  $E$  порядка 1 км. Ниже 15 км [15, 16] каждый экстремум (страта) электрического поля имеет тонкую бифуркационную структуру типа удвоения периода вплоть до флуктуационного «частотокола» с длиной волны 5–10 м. Авторы представили богатый экспериментальный материал, однако задача не рассматривалась в контексте глобальной стратификации атмосферы самосогласованным электрическим полем [17]. Для тропосферы данный подход был рассмотрен в работе [18], где на основе экспериментальных данных выявлены корреляционные зависимости между вертикальным электрическим полем и нижней границей (н. г.) облаков.

Целью настоящей статьи является рассмотрение морфологической стратификации облачных образований самосогласованным электрическим полем атмосферы в период активного и спокойного солнца. Данный подход позволит прояснить механизм изменения процессов конденсации водяного пара (на примере облаков) сменой солнечной активности как уменьшение количества возбужденных молекул за счет разной ионизации атмосферы. Таким образом, понимание физического взаимодействия электрического поля и метеорологических явлений в атмосфере позволит на качественном уровне оценивать антропогенную нагрузку

промышленных предприятий на атмосферу и климат через механизм загрязнения атмосферы промышленным аэрозолем, который приводит к существенному изменению электрического поля атмосферы.

#### Модовая стабильность вертикального распределения плотности объемного заряда в атмосфере

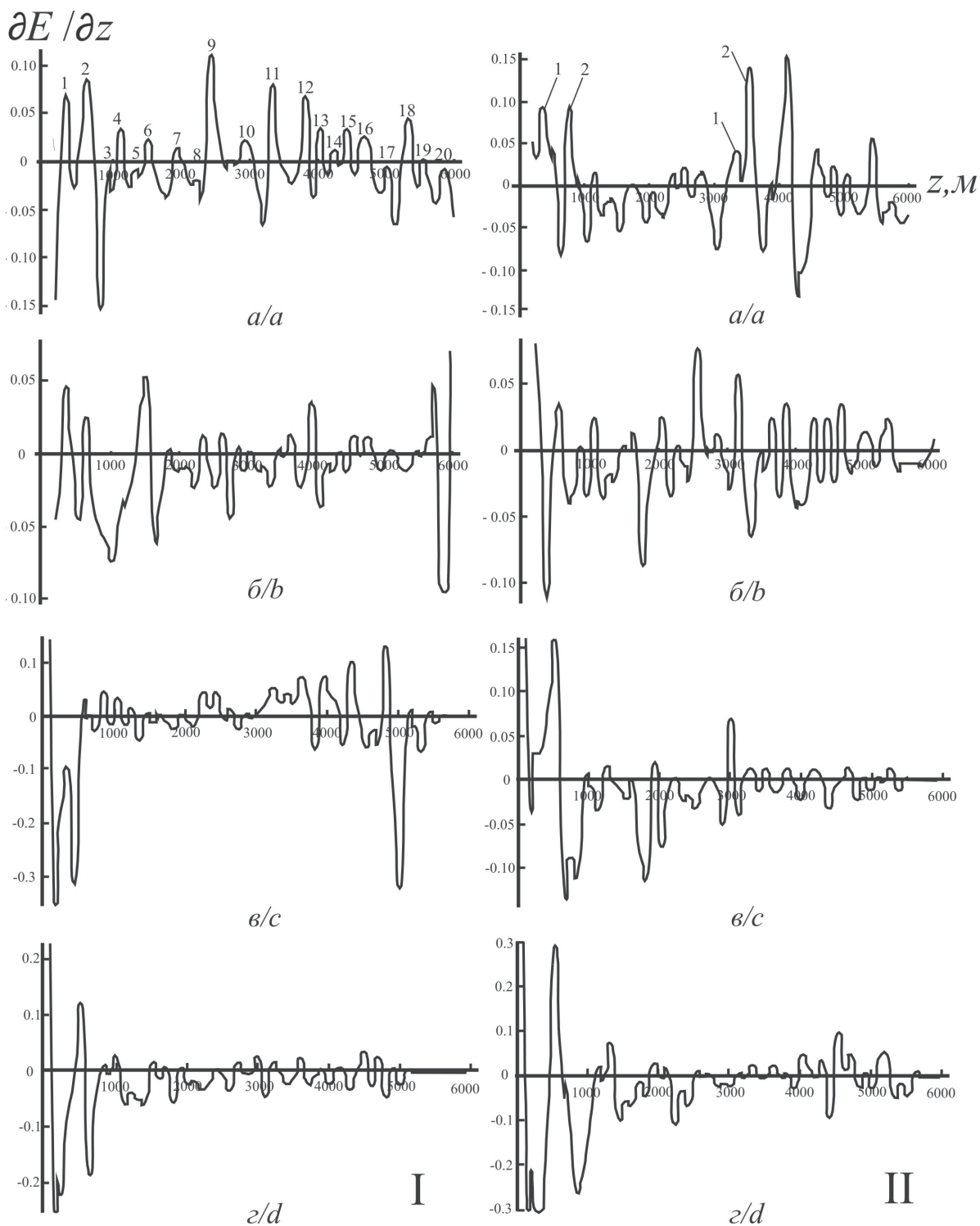
Сплайн-аппроксимация вертикального распределения производной напряженности электрического поля  $\partial E_z/\partial z$  дала возможность выявить модовую стабильность экспериментальных распределений (количество полных колебаний  $E$ ), составляющую 19–22 колебания до высот 6 км [18]. Закономерность наблюдается для всех сезонов года за весь период самолетного зондирования – с 1958 по 1965 г. На рис. 1 представлено сезонное распределение  $\partial E_z/\partial z$  на различных высотах в период активного (1958) и спокойного (1964) Солнца. Плотность объемных зарядов восстанавливалась по данным напряженности электрического поля  $E_z$  на различных высотах [19, 20], где  $1 \text{ ГГСЭ/м}^2 = 2130 \text{ э/см}^2$ .

Как видно из рис. 1, узловая стабильность локальных мод плотности объемного заряда (полные колебания  $E$ ) оказалась устойчивой в разные периоды активности солнца. Изменения происходят только в амплитуде экстремумов. При смене сезона года или ярко выраженных погодных условиях (циклоническая деятельность) число полных колебаний  $E$  варьируется как в меньшую, так и в большую сторону путем объединения или дробления экстремумов на разных высотных горизонтах, сохраняя узловую стабильность. Осредненный за весь период наблюдений массив данных выявляет ту же структуру, что и моментные наблюдения (ежедневное зондирование). Поэтому картина является не только модово устойчивой, но и подобной.

Фиксирование узловых плоскостей не является характерным для линейных задач, где при изменении граничных условий происходит изменение модового состава и сдвиг узловых точек суммы мод (фигуры стоячих волн Лиссажу). Пространственная и временная структуры электрического поля [21] не являются гармоническими функциями классической электростатики с использованием аналитических сплайнов [22], которые неявно усредняют профиль поля по средней линии для решения уравнения, параметрически зависящего от начальных условий и диэлектрической постоянной среды  $\epsilon(r)$ .

В период активного Солнца интегральная отрицательная составляющая экстремумов плотности объемного заряда существенно больше, чем в период спокойного солнца. Детальность распределения увеличивается. В период спокойного Солнца ярче выражена интегральная положительная составляющая экстремумов.

Так как сумма квантового выхода [электрон/фотон] ультрафиолетовой ионизации  $I_{uf}$ , оже-



**Рис. 1.** Сплайн-аппроксимация плотности объемного заряда  $\partial E/\partial z$  [CGSE/m<sup>3</sup>] на разных высотах, г. Ташкент: I – 1958 г.: а – январь; б – апрель; в – август; г – ноябрь; II – 1964 г.: а – январь; б – апрель; в – август; г – ноябрь. Цифры (1, ..., 20) – число полных колебаний  $E_z$ ; Цифры (1, 2 и т. д.) – дублетная структура пиков – дипольные зарядовые плоскости. Шкала x соответствует вертикальной координате Z (м)

**Fig. 1.** Spline approximation of a bulk charge density  $\partial E/\partial z$  [CGSE/m<sup>3</sup>] at different heights, Tashkent: I – 1958: a) January; b) April; c) August; d) November; II – 1964: a) January; b) April; c) August; d) November. Numbers (1, ..., 20) is the amount of full-wave oscillations  $E_z$ ; Numbers (1, 2 etc.) is the doublet structure of peaks – dipole charge planes. The scale x corresponds to vertical coordinate Z (m)

ионизации  $I_{aug}$ , электронного возбуждения  $I_{vb}$ , янтейлеровского колебательного возбуждения  $I_v$  составляет *единицу*:  $I_{uf}+I_{aug}+I_{vb}+I_v=1$ , то увеличение потока солнечной радиации приведет к перераспределению квантового выхода в сторону фото-возбуждения:  $I_{aug}+I_{vb}+I_v \gg I_{uf}$ . Это будет способствовать увеличению поляризуемости возбужденных атомов и молекул, а также большей экранировке свободных зарядов с уменьшением подвижности электронов до подвижности ионов.

В рамках модели среднего самосогласованного электрического поля [17] ионно-электронная стратификация может выступать начальным процессом, инициирующим глобальную поляризацию возбужденных и высокополярных молекул, параметры которого достаточны для поляризации типа диэлектрического резонанса. Диэлектрический резонанс описывается классическим комбинационным соотношением Максвелла–Гарнетта для активных сред [23, 24]. В таком самосогласованном поле нелинейность стабилизирует модовый состав вертикального распределения плотности объемных зарядов в пределах 19–22 пиков. Этот факт не является тривиальным и обуславливает стабильность стратификации водяного пара в вертикальном электрическом поле.

Таким образом, можно сделать предположение, что стабилизация стратифицированных слоев плотности объемного заряда происходит вследствие аномально больших величин диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  запирающей флуктуации электронно-ионной подсистемы, возбужденных и высокополярных молекул в режиме дипольной блокады [25, 26] при условии полного внутреннего отражения внутренней электромагнитной волны.

#### Геометрическое сечение частиц и капель разных радиусов

Молекулярное содержание водяного пара  $W$  (например, кучевое облако  $W \sim 0,08$  г/м<sup>3</sup>) по отношению к содержанию стандартной атмосферы ( $N_2$ ,  $O_2$ )  $\sim 1,225$  кг/м<sup>3</sup> составит величину  $0,08/1225 \approx 7 \cdot 10^{-5}$  г/м<sup>3</sup>, или  $10^{-3}$  %. Несмотря на это, геометрическое сечение ионизации для молекул стандартной атмосферы (фоновая ионизация) и облачного аэрозоля (комплексы водяного пара, капли) имеет один и тот же порядок при допустимых параметрах распределения облачных капель.

Распределение молекул и комплексов водяного пара по размерам в диапазоне от 0,5 до 1 мкм достаточно корректно описывается гамма-распределением [1]:

$$n(r) = N_0 f(r),$$

где нормированный на единицу спектр размеров капель  $f(r)$  имеет вид

$$f(r) = \frac{1}{\Gamma(\alpha + 1)\beta^{\alpha+1}} \exp\left(-\frac{r}{\beta}\right),$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – безразмерные параметры распределения.

Данное распределение описывает связь характерного размера капель с такими параметрами облачности, как водность  $W$  и концентрация частиц  $N$ . Ввиду того, что гамма-распределение является малопараметрическим, то с увеличением среднего влагосодержания увеличивается и количество комплексов водяного пара, а также средний размер комплекса. Пропорциональность сохраняется в диапазоне изменения количества комплексов и составляет девять порядков  $N \sim 10^{-6} \dots 10^3$  см<sup>-3</sup>.

Оценим эффективное поперечное сечение молекул стандартной атмосферы на примере молекулы  $O_2$  и капель разного радиуса в геометрическом приближении. Представим себе слой газа объемом 1 см<sup>3</sup>. Пусть газ состоит из молекул, имеющих сечение  $\sigma$ , а плотность молекул (их число в единице объема) равна  $N_L$ , где  $N_L$  – число Лошмидта. Предположим, что все молекулы слоя покоятся, а к нему приближается одна молекула, которая при прохождении через слой может испытать в нем столкновение. Тогда геометрическое сечение плоской площадки для всех молекул будет иметь вид

$$\sigma = S^2 \sqrt[3]{(N_L)^2}.$$

В табл. 1 представлены результаты геометрических сечений молекул  $O_2$  (фоновая ионизация) для разных высот (0, 5, 15 км). В табл. 2 – результаты геометрических сечений капель разных радиусов (1 – ядра конденсации, 2 – облачные частицы, 3 – капли осадков).

**Таблица 1.** Геометрическое сечение молекул (фоновая ионизация) для разных высот (0, 5, 15 км)

**Table 1.** Geometric cross-section of molecules (background ionization) for different heights (0, 5, 15 km)

Высота $H$ , км Height $H$ , km	Число Лошмидта $N_L$ , см <sup>3</sup> [27] Loschmidt number $N_L$ , cm <sup>3</sup> [27]	Площадь молекулы $S_{O_2}$ , см <sup>2</sup> $S_{O_2}$ molecule area, cm <sup>2</sup>	Сечение $\sigma$ , см <sup>2</sup> Cross-section $\sigma$ , cm <sup>2</sup>
0	$1,94 \cdot 10^{19}$	$8,64 \cdot 10^{-16}$	$0,62 \cdot 10^{-2}$
5	$0,84 \cdot 10^{19}$	$8,64 \cdot 10^{-16}$	$0,36 \cdot 10^{-2}$
15	$0,16 \cdot 10^{19}$	$8,64 \cdot 10^{-16}$	$0,12 \cdot 10^{-2}$

**Таблица 2.** Геометрическое сечение капель (конденсированная фаза)

**Table 2.** Geometrical cross-section of drops (condensed phase)

Капли Drops	Радиус капель $r_{min} - r_{max}$ , см [28] Drops radius $r_{min} - r_{max}$ , cm [28]	Средний радиус $\langle r \rangle$ , см Average radius $\langle r \rangle$ , cm	Водность $W$ , г/м <sup>3</sup> Water content $W$ , g/m <sup>3</sup>	Концентрация $N$ , см <sup>3</sup> Concentration $N$ , cm <sup>3</sup>	Сечение $\sigma$ , см <sup>2</sup> Cross-section $\sigma$ , cm <sup>2</sup>
1	$10^{-7} - 10^{-4}$	$10^{-5}$	0,08	300	$0,2 \cdot 10^{-5}$
2	$10^{-4} - 10^{-2}$	$10^{-3}$			$0,2 \cdot 10^{-1}$
3	$10^{-2}$	$10^{-2}$			1,8

Примечание. Капли: 1 – ядра конденсации, 2 – облачные частицы, 3 – капли осадков.

Note. Drops: 1 are the condensation nuclei; 2 are the cloud particles; 3 are the rain drops.



Как видно из табл. 2, при среднем характерном радиусе капель  $\langle r \rangle = 10^{-3}$  [см] геометрическое сечение имеет сравнимый порядок, как и сечение молекул в промежутке высот 0–5 км (табл. 1). Простые оценки показывают, что ионизация от конденсированной фазы при определенных параметрах соизмерима с фоновой ионизацией стандартной атмосферы, так как путь пробега радиационной частицы в конденсированной фазе будет больше (капля 1 микрон  $\sim 10^4$  молекул воды), чем в сухой атмосфере.

Согласно [29], длина пробега жесткой компоненты излучения  $L_\gamma$  на разных высотах имеет следующие параметры: при  $h \sim 0$  км  $L_\gamma \sim 300$  м, при  $h \sim 10$  км  $L_\gamma \sim 690$  м. Такие величины соизмеримы со средней вертикальной протяженностью облаков (например, Sc) [30]. Таким образом, электроны, проходя конденсированную фазу (облако), полностью теряют свою энергию до значений 1–10 эВ [31] и локализируются облаком. Это может означать, что конденсированная фаза служит дополнительным источником ионизации, поддерживающей электрическую стабилизацию облака. При этом важно заметить, что заряды капель в облаке могут достигать больших значений  $q \sim 2000e$  [32], где  $e$  – элементарный заряд.

Следовательно, полярноактивная фаза, накапливаясь в страте (экстремум поля  $E$ ) в молекулярной форме (молекулы и комплексы  $(H_2O)_n$ ), будет приводить к симбатному накоплению микрокапель водяного пара в экстремумах электрического поля атмосферы.

Рассмотрим связь средней водности в облаках типа St–Sc и вертикального профиля напряженности электрического поля до высот 1,5 км. Для построения регрессионной зависимости в работе использованы результаты измерений водности (4800 измерений), выполненных на самолетах-лабораториях ИЛ-14 за холодный период (1960–1964 гг.) над Украиной [33], и данные напряженности электрического поля на различных высотах, осредненные за весь период наблюдений (1964 г.) [20].

Регрессионная зависимость средней водности облака  $W$  [г/кг] для облаков типа St–Sc и среднегодовой структуры вертикального электрического поля  $E$  [В/м] представлена на рис. 2. Данные регрессионного анализа сведены в табл. 3.

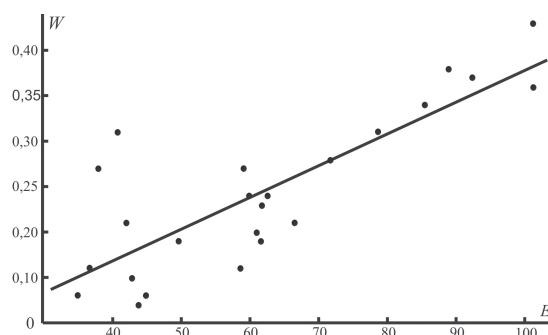


Рис. 2. Корреляционная зависимость средней водности облака  $W$  [г/кг] от вертикального электрического поля  $E$  [В/м]

Fig. 2. Correlation dependence of cloud average water content  $W$  [g/kg] on vertical electric field  $E$  [V/m]

Линейная корреляционная зависимость, представленная на рис. 2, получена методом наименьших квадратов по 24 экспериментальным точкам. Уравнение регрессии для всего ряда ( $n=24$ ), связывающее водность облака  $W$  и напряженность поля  $E$ , имеет вид

$$W = 0,028 + 0,0034E. \quad (1)$$

Если обратиться к рис. 2, можно заметить, что вертикальное распределение водности хорошо группируется относительно величины электрического поля. Так, например, значениям напряженности электрического поля в диапазоне от 0 до 40 В/м соответствуют девять значений водности. Уравнение регрессии для них имеет вид  $W=0,243-0,0013E$ . Значениям напряженности электрического поля в диапазоне от 40 до 110 В/м соответствуют пятнадцать значений водности, уравнение регрессии для них имеет вид  $W=-0,064+0,0046E$ .

Анализ результатов показал, что среднее распределение водности хорошо согласуется со среднегодовым распределением напряженности электрического поля для данного региона. На основе данных выделяется участок слабых полей (0–40 В/м) и ординарных (порядка 40–110 В/м). Можно предположить, что аналогичная зависимость будет существовать и внутри других облачных образований. С увеличением водности термодинамически возрастает средний размер капель, увеличивается геометрическое сечение и возрастает ионизация конденсированной фазы.

Таблица 3. Соответствие экспериментальных и рассчитанных по уравнению (1) данных водности  $W$  и напряженности электрического поля  $E$

Table 3. Correspondence of the experimental data on water content  $W$  and electric field intensity  $E$  to the data calculated by the equation (1)

$E$	88,4	101,3	101,3	92,4	85,5	78,6	71,7	66,5	62,5	60,9	61,6	61,8	59,9	59,0	58,6	49,6	44,9
$W_{\text{эк}}$	0,38	0,42	0,36	0,37	0,34	0,31	0,28	0,21	0,24	0,20	0,19	0,23	0,24	0,27	0,16	0,19	0,13
$W_{\text{в}}$	0,35	0,40	0,40	0,36	0,33	0,30	0,27	0,24	0,22	0,21	0,22	0,22	0,21	0,20	0,2	0,16	0,14

Примечание.  $E$  – экспериментальная вертикальная напряженность электрического поля,  $W_{\text{эк}}$  – экспериментальная вертикальная водность,  $W_{\text{в}}$  – вертикальная водность, вычисленная по уравнению (1).

Note.  $E$  is the experimental vertical intensity of electric field;  $W_{\text{эк}}$  is the experimental vertical water content;  $W_{\text{в}}$  is the vertical water content, calculated by the equation (1).

### Влияние солнечной активности на общие характеристики облачности

Во всем цикле самолетных измерений электрического поля атмосферы [19, 20] во время полетов синхронно с электрическим полем измерялась высота нижней и верхней границы облачности, а также атмосферные явления, что является важным метеорологическим фактором, не измеряемым при наземных наблюдениях. Общее количество вылетов в 1958 г. (активное Солнце) составило 173, в 1965 г. (спокойное Солнце) – 150. Для анализа поведения облачности за данные периоды были выбраны облака нижнего яруса – Sc, Ns, среднего (Ac, As) и вертикального развития (Cu).

На рис. 3 представлены частотные диаграммы повторяемости высоты н. г. облачности за 1958 и 1964 гг. Числовые значения сведены в табл. 4. Рисунки повернуты так, чтобы горизонтальная ось соответствовала высоте  $Z$ , [км], вертикальная ось – количеству наблюдаемой облачности.

**Таблица 4.** Общее число наблюдаемых случаев образования нижней границы облаков по морфотипам и количество вертикальных горизонтов, на которых фиксировалась нижняя граница облаков

**Table 4.** Total number of the observed events of the lower cloud boundary formation by the morphotypes and the number of vertical horizons, where the lower cloud boundary was registered

Облачность Cloud	Число занимаемых горизонтов Number of vertical horizons		Общее число наблюдаемых случаев Total number of observed events	
	1958	1964	1958	1964
Sc	29	9	66	13
Ns	19	9	43	10
As	36	13	81	16
Ac	39	30	126	57
Cu	3	9	3	9

Как видно из рис. 3, основной чертой частотно-го распределения высоты образования н. г. облачности является ее дискретность распределения (не непрерывное) по горизонтам в течение наблюдаемых периодов и наличие горизонтов, где облачность отсутствует. В период активного солнца высота образования н. г. облаков (общее число наблюдаемых случаев) для всех представленных морфотипов (кроме Cu) в два раза, а по некоторым в 4–5 раз превышает значения, наблюдаемые в период спокойного солнца (табл. 4). Качественно это соответствует природе конденсации пара на заряженных центрах и ионах при увеличении ионизации атмосферы (см., например, [34]), то есть очевиден радиационно-электрический характер общей стратификации водяного пара.

Остановимся на статистических особенностях облачности в разные периоды солнечной активности.

**Stratocumulus (Sc).** Высота н. г. облаков Sc отмечается чаще всего в пределах 0,5–1,5 км, тол-

щина слоя – от 0,2 до 0,8 км [30]. Далее по тексту при описании средних значений высоты нижней границы используются данные из справочника [30].

**Активное Солнце (1958):** наблюдаемый массив н. г. Sc (рис. 3, в) представлен сравнительно равномерным слоем, расположенным на 29 горизонтах от 0,3 до 4,1 км, что существенно отличается от средних значений н. г. (0,5–1,5 км). Из них однородный слой состоит из 21 горизонта от 0,3 до 2,3 км. Остальные восемь горизонтов имеют дискретную структуру, занимают высоты от 2,3 до 4,1 км и разделены между собой пустыми горизонтами (облачность не наблюдалась за весь период наблюдений). Максимумы встречаемости н. г. Sc расположены на высотах 0,5; 0,9; 1,1; 1,4; 1,6; 2,5 км. Пустые горизонты расположены на высотах 2,7–3; 3,1–3,4; 3,4–3,6; 3,6–4,1 км. Ширина пустых горизонтов составляет 0,2; 0,3; 0,3; 0,5 км.

**Спокойное Солнце (1964):** наблюдаемый массив н. г. Sc (рис. 3, г) расположен на девяти горизонтах от 0,5 до 1,9 км. Весь массив представлен дискретными слоями, разделенными пустыми горизонтами. Наблюдаются только два максимума – 0,5 и 0,8 км.

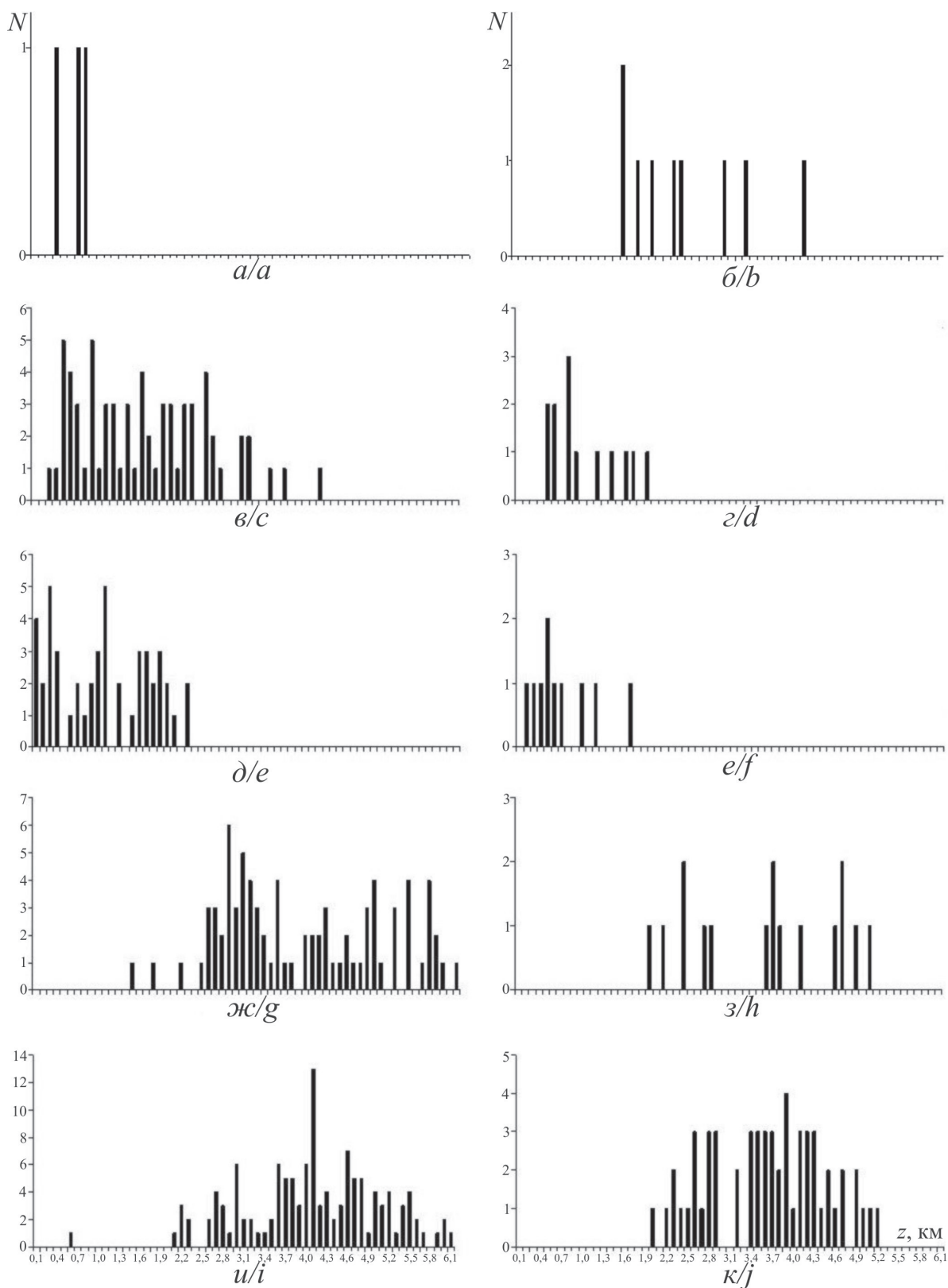
**Nimbostratus (Ns).** Высота нижней границы Ns отмечается в пределах от 0,5 до 1,9 км, она ниже всего вблизи линии фронта. Толщина слоя облаков обычно достигает 2–3 км, иногда 5 км и более.

**Активное Солнце (1958):** наблюдаемый массив н. г. Ns (рис. 3, д) расположен на 19 горизонтах от 0,1 до 2,3 км. Горизонты сгруппированы в три группы, разделенные пустым межоблачным пространством, с характерными максимумами в каждой группе. Максимумы повторяемости н. г. Ns расположены на высотах 0,1; 0,3; 1,1; 1,6 км. Пустые межоблачные горизонты расположены на высотах 0,4–0,6; 1,1–1,6; 2,1–2,3 км. Ширина пустых горизонтов составляет 0,2; 0,5; 0,2 км.

**Спокойное Солнце (1964):** наблюдаемый массив н. г. Ns (рис. 3, е) расположен равномерным слоем на девяти горизонтах от 0,7 до 2,3 км с максимумом на 0,5 км. Весь массив неоднороден и представлен дискретными слоями, разделенными пустыми межоблачными горизонтами.

**Altostratus (As).** Высота их нижней границы может меняться в пределах от 2 до 6 км, а толщина слоя не превышает 200–700 м.

**Активное Солнце (1958):** наблюдаемый массив н. г. As (рис. 3, ж) расположен равномерным сплошным слоем на 39 горизонтах от 0,6 до 6,1 км. Массив имеет близкое к логнормальному распределение с центральным пиком и симметричными сторонами от него. Главный максимум расположен на высоте 4,1 км и проявляется в обоих периодах солнечной активности. Другие максимумы расположены на высотах 2,1; 3,1; 4,9; 5,6 км. Данный тип облачности – единственный из всех наблюдаемых, который имеет сплошной слой горизонтов.



**Рис. 3.** Частотные диаграммы повторяемости высоты н. г. облаков. 1958 г.: а – Cu; в – Sc; д – Ns; ж – As; и – Ac; 1964 г.: б – Cu; г – Sc; е – Ns; з – As; к – Ac. N – количество наблюдаемой облачности; Z – вертикальная координата, км

**Fig. 3.** Frequency diagrams of the lower cloud boundary recurrence: 1958: a – Cu; c – Sc; e – Ns; g – As; i – Ac; 1964: b – Cu; d – Sc; f – Ns; h – As; j – Ac. N is the amount of the observed cloudiness; Z is the vertical coordinate, km

*Спокойное Солнце (1964)*: наблюдаемый массив н. г. As (рис. 3, з) расположен равномерным сплошным слоем на 30 горизонтах от 2 до 5,2 км. Массив расположен двумя группами, разделенными межоблачными горизонтами. Максимумы расположены на высотах 2,8; 3,5; 3,9; 4,2 км. Межоблачные горизонты занимают слои 2,9–3,4 и 4,7–4,9 км.

**Alto cumulus (Ac)**. Высота нижней границы As находится в пределах от 2 до 6 км, толщина слоя составляет обычно 1–2 км, иногда и более.

*Активное Солнце (1958)*: наблюдаемый массив высоты образования н. г. As (рис. 3, и) расположен относительно сплошным слоем на 36 горизонтах от 1,5 до 6,2 км. Массив имеет три характерные группы, разделенные пустым межоблачным пространством, с характерными максимумами для каждого из групп. Две первые группы имеют сплошной слой горизонтов: первая от 2,5 до 3,8 км, вторая – от 4,0 до 5,1 км. Третья группа имеет дискретную структуру, состоящую из восьми слоев, четыре из которых расположены сплошным слоем на высоте 5,7–6,0 км. Каждая из групп имеет свои характерные максимумы. От высоты 1,5 до 2,5 км горизонты расположены дискретно, с равной повторяемостью высоты образования н. г. облачности.

*Спокойное Солнце (1964)*: наблюдаемый массив н. г. As (рис. 3, к) расположен дискретно на 13 горизонтах от 2 до 5,2 км. Массив также представлен тремя группами, разделенными пустым межоблачным пространством. Межоблачные горизонты между группами существенно больше, чем в период активного солнца и составляют 2,9–3,7 и 4,2–4,7 км. Каждая из групп имеет свои максимумы повторяемости н. г., соответствующие высотам 2,5; 3,8 и 4,8 км.

**Cumulus (Cu)**. Высота нижней границы кучевых облаков в значительной мере зависит от влажности воздуха (от дефицита насыщения). В умеренных широтах высота нижней границы кучевых облаков обычно составляет 0,6–1,2 км, вертикальная протяженность – от сотни метров до нескольких километров.

*Активное Солнце (1958)*: н. г. облачности Cu (см. рис. 3, а) имеет дискретную структуру и встречается исключительно на трех горизонтах: 0,4; 0,7 и 0,8 км.

*Спокойное Солнце (1964)*: н. г. облачности Cu (рис. 3, б) также имеет дискретную структуру, но число горизонтов – восемь, расположены от 1,6 до 4,1 км. Имеется один максимум на высоте 1,6 км.

Подводя итог можно сделать следующие выводы. Все частотные диаграммы повторяемости высоты н. г. облаков имеют дискретный характер. Облачные горизонты сгруппированы по группам (непрерывные горизонты вертикальной протяженностью 0,5–1,5 км) и разделены между собой пустыми межоблачными горизонтами. Из рассматриваемых в данной статье по морфологическому

признаку видов облаков исключение составили облака Sc, которые расположены относительно сплошным слоем.

Таким образом, за период наблюдений 1958, 1964 гг. статистически достоверно выявлена существенная неравномерность распределения н. г. облачности по горизонтам, а также существование межоблачных горизонтов, где облака не образовывались.

Существуют закономерности в деталях распределения, которые опущены в силу сложности изменения картины вертикального распределения облаков по горизонтам. Классическим примером распределения облачности можно считать распределение Ac, которое соответствует логнормальному или гауссовому распределению как в 1958, так и в 1964 г. Другие морфотипы проявляют более сложное многомодальное распределение н. г. облачности по высоте.

Сезонные изменения в этом контексте сводятся к перераспределению влаги между горизонтами. Можно предположить, что такая картина создается сильными электрическими взаимодействиями заряженного аэрозоля облака как внутри морфологического типа, так и между отдельными горизонтами, используя механизм испарения в электрическом поле [35].

Интересным оказался случай с распределением конвективных облаков вертикального развития Cu, когда в 1964 г. наблюдалось большее количество облаков, чем в 1958 г. Можно предположить, что большее количество облаков Cu, наблюдаемое в период спокойного солнца, говорит о том, что степень ионизации атмосферы была менее интенсивной в вышележащих слоях атмосферы, что привело к более интенсивной конвекции от приземного слоя. Данный случай требует отдельного изучения, так как не совсем ясен физический механизм.

#### Соответствие н. г. облаков электрическому полю атмосферы

Рассмотрим статистический анализ частотного распределения н. г. облаков по вертикальным горизонтам и структуру электрического поля на различных высотах на примере спокойного солнца. На рис. 4 представлены профиль напряженности электрического поля  $E$ , производная от напряженности электрического поля  $\partial E_z / \partial z$ , сплайн-диаграмма статистического распределения повторяемости н. г. облаков As на разных высотах и совмещенный график точек равновесия  $\partial E_z / \partial z = 0$  и максимумов повторяемости н. г. облаков As. Детальное соответствие н. г. исследуемых облаков и локальных точек равновесия приведено в [18].

Как видно из рис. 4, статистический анализ повторяемости высоты н. г. облаков по морфотипам дает высокое совпадение с локальными точками равновесия электрического поля, где плотность объемного заряда равна нулю:  $\partial E_z / \partial z = 0$ . В большинстве случаев высота н. г. облачных горизонтов



**Таблица 5.** Соответствие высот нулевых значений  $\partial E_z/\partial z=0$  высот частотных распределений нижней границы образования облачности (Ташкент, 1964 г.)

**Table 5.** Correspondence of heights of zero values  $\partial E_z/\partial z=0$  to the heights of frequency distribution of the lower boundary of cloud formation (Tashkent, 1964).

Высота максимумов повторяемости нижней границы облаков, м Height of maximum of cloud lower boundary frequency, m					Высота точек локального равновесия $\partial E_z/\partial z=0$ , м Height of local equilibrium points $\partial E_z/\partial z=0$ , m	
Sc	Ns	Ac	Ac	As		
500	200	2000	3800	2000	510	3457
600	300	2200	3900	2200	600	3600
800	400	2300	4000	2500	763	3700
900	500	2400	4100	2800	1529	3942
1200	600	2500	4200	2900	1590	4000
1400	700	2600	4300	3700	1900	4057
1600	1000	2700	4400	3800	2000	4400
1700	1200	2800	4500	3900	2500	4657
1900	1700	2900	4600	4200	2566	4800
–	–	3200	4700	4700	2809	4900
–	–	3400	4900	4800	2866	5142
–	–	3500	5000	5000	3000	5257
–	–	3600	5100	5200	3100	5421
–	–	3700	5200	–	3242	5642

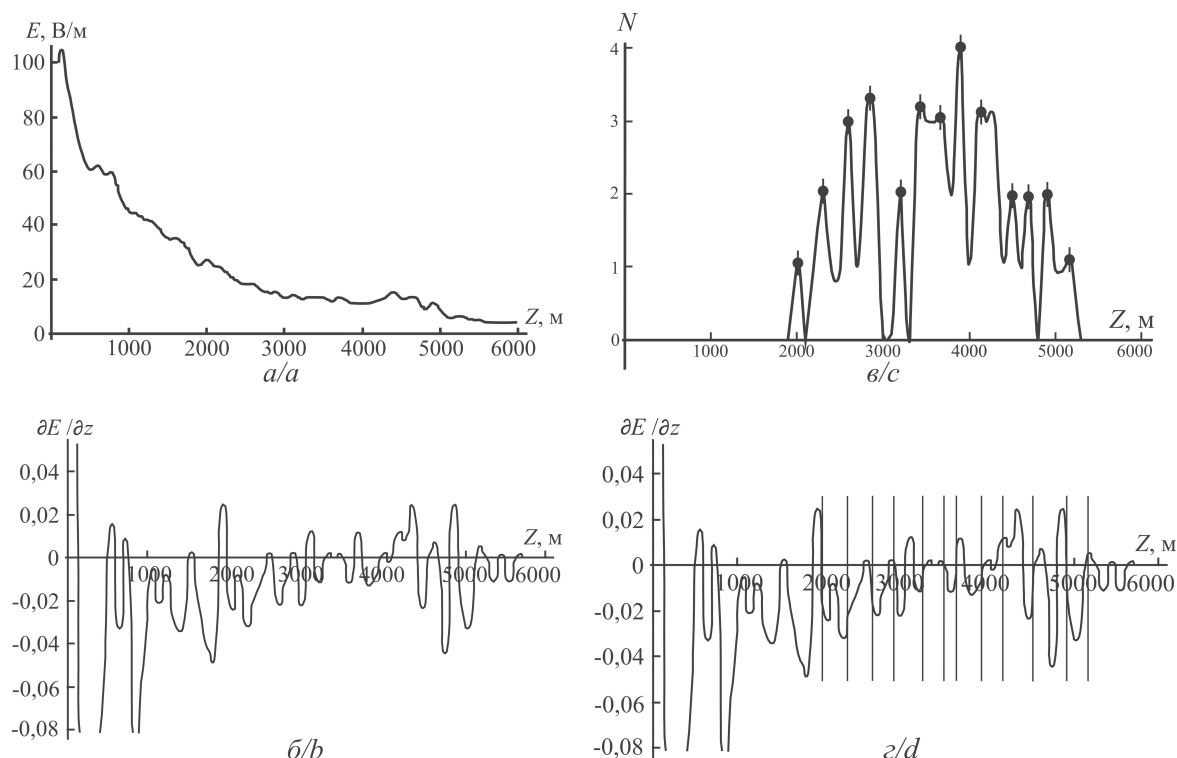
совпадает с горизонтами, где  $\partial E_z/\partial z$  обращается в ноль и составляет  $\pm 50\text{--}100$  м при вертикальной протяженности облачного слоя 250–500 м. Совпадение наблюдается для всех видов облаков, а также для усреднения по сезонам и годам [18]. Коэффициент корреляции  $R$  составляет 0,9 при доверительном интервале 0,95 %.

Как видно из табл. 5, высота повторяемости н. г. облаков (годовая статистическая вероятность) совпадает с серединной стратификацией электрического поля (локальными точками зарядовой нейтральности).

Данное соответствие не зависит от вида облачности, хотя сами распределения облаков для разных видов существенно различаются. Такое совпадение наблюдается и для частотного распределения водяного пара с высотой. Как было показано выше (рис. 2), водность облака и напряженность электрического поля хорошо коррелируют между собой.

### Заключение

В статье рассмотрен детальный статистический анализ соответствия повторяемости н. г. облаков по горизонтам вертикальной структуре электриче-



**Рис. 4.** Электрические характеристики атмосферы и сплайн-диаграмма повторяемости н. г. облаков Ac, г. Ташкент, 1964 г.: а – напряженность электрического поля  $E$ ; б – плотность объемных зарядов  $\partial E_z/\partial z$  [СГСЭ],  $1 \text{ СГСЭ}/\text{м}^2=2130 \text{ э}/\text{см}^2$ ; в – сплайн-диаграмма повторяемости н. г. облаков Ac (максимумы отмечены точками),  $N$  – количество наблюдаемой облачности; г – совмещенный график плотности объемного заряда с максимумами н. г. облаков Ac (штриховые линии) в точках локального равновесия  $\partial E_z/\partial z=0$ . Вертикальная шкала  $Z$  расположена в горизонтальном положении

**Fig. 4.** Electrical characteristics of the atmosphere and spline-diagram of the lower cloud boundary recurrence Ac, Tashkent, 1964: a is the intensity of the electrical field  $E$ ; b is the density of bulk charges  $\partial E_z/\partial z$  [CGSE],  $1 \text{ CGSE}/\text{m}^2=2130 \text{ e}/\text{cm}^2$ ; c is the spline-diagram of the lower cloud boundary recurrence Ac (maximums are marked by dots),  $N$  is the number of the observed cloudiness; d is the matched graph of the bulk charge density and maximums of the lower cloud boundary Ac (dashed lines) in the points of local equilibrium  $\partial E_z/\partial z=0$ . The vertical scale  $Z$  is in a horizontal position

ского поля атмосферы на различных высотах (термодинамический аспект не затронут). Наблюдается устойчивое вертикальное совпадение максимумов облаков с максимумами электрического поля. Статистически достоверно подтверждена существенная неравномерность распределения н. г. облачности по горизонтам в разные периоды солнечной активности, а также существование межоблачных горизонтов, где облака не образовывались за весь период наблюдений.

Выявлена узловая стабильность локальных мод плотности объемного заряда (полные колебания  $E$ ), которая оказалась устойчивой в разные периоды активности солнца. При смене сезона года число полных колебаний  $E$  варьируется как в меньшую, так и в большую сторону путем объединения или дробления экстремумов на различных высотных горизонтах, сохраняя узловую стабильность.

В квазистационарных условиях облака имеют характерное распределение капель по размерам для каждого морфотипа. Распределение молекул и комплексов водяного пара по размерам достаточно корректно описывается гамма-распределением. Ввиду того, что гамма-распределение является малопараметрическим, существует кросс-зависимость между средними значениями распределения капель по размерам, концентрацией капель и общим содержанием влаги. Простые геометрические оценки показывают, что наряду с сухой атмосферой конденсированная фаза дает сравнимый вклад в электростатику облака путем увеличения сечения ионизации за счет укрупнения капель, так как

путь пробега радиационной частицы в конденсированной фазе будет больше, чем в сухой атмосфере. Это приводит к тому, что в зависимости от соотношения интенсивности ионизации происходит перераспределение облачного аэрозоля в промежутках глобального многослойного конденсатора атмосферы. Можно предположить, что типы облаков выделяются путем перераспределения капель в неоднородном стратифицированном электрическом поле сухой атмосферы.

В таком самосогласованном поле нелинейность стабилизирует модовый состав вертикального распределения ионов и электронов в пределах 19–22 полных колебаний. Этот факт не является тривиальным. Он обуславливает стабильность стратификации водяного пара в вертикальном электрическом поле, что, по сути, формирует стабильность глобальной вертикальной стратификации облачности электрическим полем атмосферы.

Таким образом, радиационный фон жесткой компоненты Солнца вносит существенный вклад в величину молекулярной поляризации атмосферы как средней законсервированной энергии в глобальную стратификацию возбужденной подсистемы атмосферы и глобальную стратификацию водяного пара.

Практически это означает, что загрязнение атмосферы может оказать критическое воздействие на поляризационный потенциал в области критических флуктуаций, не редуцируясь к прямому пропорциональному стехеометрическому воздействию физико-химического типа, что может быть причиной катастрофических изменений климата.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khvorostyanov V.I., Curry J.A. Thermodynamics, kinetics, and microphysics of clouds. – New York: Cambridge U. Press, 2014. – 782 p.
2. Handbook of weather, climate and water. Dynamics, Climate, Physical Meteorology, Weather Systems, and Measurements / Ed. by T.D. Potter, B.R. Colman. – Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2003. – 974 p.
3. Thomson J.J., Thomson G.P. Conduction of electricity through gases, 3<sup>rd</sup> ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 1928. – 192 p.
4. Оболенский В.Н. Роль ионов, нейтральных и заряженных пылинки и химически активных ядер при образовании облаков и туманов // Журнал геофизики. – 1934. – Т. 4. – Вып. 1. – С. 90–103.
5. Rusanov A.I., Kuni F.M. Reformulation of the thermodynamic theory of nucleation on charged particles // Journal Colloid Interface Science. – 1984. – V. 100. – № 1. – P. 264–277.
6. Yu F. Modified Kelvin–Thomson equation considering ion-dipole interaction: comparison with observed ion-clustering enthalpies and entropies // Journal Chemical Physics. – 2005. – V. 122. – P. 084503–1–084503–8.
7. Influence of surface effects in vapor condensation on a nanodimensional aerosol particle having an electric charge / V.V. Levandanski, V.L. Dragun, J. Smolik, V. Zdimal, P. Moravec // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2007. – V. 80. – № 1. – P. 57–63.
8. WMO. Atmospheric Ozone 1985: Assessment of our understanding in the processes controlling its present distribution and change. WMO, report no. 16. – Geneva, 1150 p.
9. Vostrikov A.A., Dubov D.Yu. Absolute cross sections of electron attachment to molecular clusters. P. II: Formation of  $(\text{H}_2\text{O})_n^+$ ,  $(\text{N}_2\text{O})_n^+$ ,  $(\text{N})_n^+$  // Technical Physics. – 2006. – V. 51. – № 12. – P. 1537–1552.
10. Смирнов Б.Н. Возбужденные атомы. – М.: Энергоиздат, 1982. – 231 с.
11. Дегтярев В.С., Тучков Г.А., Тютин А.А. Результаты ракетных измерений УФ-излучения в нижней мезосфере и стратосфере // Распространение радиоволн и физика атмосферы. – Новосибирск: Наука, 1981. – С. 211–214.
12. Брагин Ю.А. Исследование знака пространственного заряда атмосферы до высоты 86 км // Космические исследования. – 1969. – Т. 5. – Вып. 3. – С. 465–467.
13. Брагин Б.А., Шамахов Б.Ф. Прямые исследования знака пространственного заряда атмосферы ниже 50 км // Космические исследования. – 1969. Т. 7. – № 5. – С. 741–746.
14. Брагин Ю.А., Тютин А.А., Кочев А.А., Тютин А.А. Прямые измерения напряженности электрического поля атмосферы до 80 км // Космические исследования. – 1974. – Т. 12. – Вып. 2. – С. 306–308.
15. Stolzenburg M., Marshall T.C., Krehbiel P.R. Initial electrification to the first lightning flash in New Mexico thunderstorms // Journal of geophysical research: Atmospheres. – 2015. – V. 120. – № 21. – P. 11,253–11,276.

16. Planetary Atmospheric Electricity / F. Leblanc, K.L. Aplin, Y. Yair, R.G. Harrison, J.P. Lebreton, M. Blanc. – London: Springer, 2008. – 535 p.
17. Белый Т.А., Зеленин Ю.А. Электростатическая стратификация глобальной облачной системы самосогласованным полем метастабильной электронно-ионной подсистемы атмосферы // Геофизический журнал. – 2013. – Т. 35. – № 2. – С. 111–126.
18. Белый Т.А., Зеленин Ю.А. Аналитическое исследование природы соответствия электростатической и облачной стратификации атмосферы // Геофизический журнал. – 2013. – Т. 35. – № 4. – С. 140–153.
19. Материалы наблюдений напряженности электрического поля атмосферы на различных высотах по данным самолетного зондирования в период международного геофизического года и международного геофизического сотрудничества 1958–1959 гг. / под ред. И.М. Имянитова. – Л.: Гидрометеиздат, 1963. – 228 с.
20. Материалы наблюдений напряженности электрического поля атмосферы на различных высотах 1964. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – 69 с.
21. Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ / под ред. М.С. Александрова. – М.: Наука, 1972. – 195 с.
22. Имянитов И.М., Чубарина Е.В. Электричество свободной атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – 240 с.
23. Ораевский А.Н. Существует ли коллективный диэлектрик? // Письма в ЖЭТФ. – 2003. – Т. 78. – Вып. 1. – С. 8–10.
24. Диэлектрическая проницаемость полимерных матриц, содержащих изолированные включения: гигантское диэлектрическое усиление вместо коллективного резонанса / А.В. Турик, Г.С. Радченко, А.И. Чернобабов, С.А. Турик // Письма в ЖЭТФ. – 2004. – Т. 79. – Вып. 9. – С. 512–514.
25. Murillo M.S., Bergeson S.D. Ultracold neutral plasmas well into the strongly coupled regime // Advances in atomic, molecular, and optical physics. – 2015. – V. 64. – P. 223–271.
26. Microwaves probe dipole blockade and van der Waals forces in a cold rydberg gas / R.C. Teixeira, C. Hermann-Avigliano, T.L. Nguyen, T. Cantat-Moltrecht, J.M. Raimond, S. Haroche, S. Gleyzes, M. Brune // Physical review letters. – 2015. – V. 115. – № 1–3. – P. 013001–013005.
27. Таблицы физических величин. Справочник / под ред. акад. И.К. Киикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
28. Aerosol size distribution and new particle formation in the western Yangtze River Delta of China: 2 years of measurements at the SORPES station / X.M. Qi, A.J. Ding, W. Nie, T. Petäjä, V.-M. Kerminen, E. Herrmann, Y.N. Xie, L.F. Zheng, H. Manninen, P. Aalto, J.N. Sun, Z.N. Xu, X.G. Chi, X. Huang, M. Boy, A. Virkkula, X.-Q. Yang, C.B. Fu., M. Kulmala // Atmospheric chemistry and physics. – 2015. – V. 15. – № 21. – P. 12445–12464.
29. Golubkov G.V., Golubkov M.G., Karpov V.I. Microwave radiation of the atmosphere induced by a pulsed gamma source // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2011. – V. 5. – № 3. – P. 406–412.
30. Беспалов Д.П., Девяткин А.М., Довгалюк Ю.А., Кондратюк В.И., Кулешов Ю.В., Светлова Т.П., Суворов С.С., Тимофеев В.И. Атлас облаков. – Санкт-Петербург: РИФ «ДГАРТ», 2011. – 248 с.
31. Electron scattering cross sections for the modelling of oxygen-containing plasmas / L.L. Alves, P. Coche, M.A. Ridenti, V. Guerra // The European physical journal D. – 2016. – V. 70. – № 6. – P. 1–9.
32. Ardon-Dryer K., Huang Y.-W., Cziczko D.J. Laboratory studies of collection efficiency of sub-micrometer aerosol particles by cloud droplets on a single-droplet basis // Atmospheric chemical physics. – 2015. – V. 15. – № 16. – P. 9159–9171.
33. Статистические характеристики водности слоистообразных облаков на Украине / Н.М. Галаджий, А.Л. Затовский, В.Н. Подгурская, И.П. Половина // Труды УкрНИГМИ. – 1965. – Вып. 50. – С. 97–105.
34. Исследования конденсации пересыщенного водяного пара при ионизации атмосферы и сопутствующего характеристического ИК-излучения / Ю.Н. Пономарев, А.В. Климкин, А.С. Козлов, В.В. Колосов, Г.Ф. Крымский, А.Н. Курак, С.Б. Малышкин, А.К. Петров // Солнечно-земная физика. – 2012. – Вып. 21. – С. 58–61.
35. Sekimoto K., Takayama M. Mass Spectrometric Study of Negative Atmospheric Ion Water Clusters Formed by Atmospheric Pressure Corona Discharges // Bunseki Kagaku. – 2013. – V. 62. – № 11. – P. 955–963.

Поступила 29.08.2016 г.

#### Информация об авторах

**Белый Т.А.**, кандидат географических наук, старший научный сотрудник отдела глубинных процессов Земли и гравиметрии Института геофизики НАН Украины.

UDC 437.21:551.576

## MORPHOLOGICAL STRATIFICATION OF CLOUDS BY ATMOSPHERIC ELECTRIC FIELD IN ACTIVE AND QUIET SUN PERIOD

Taras A. Bely,  
belyit@gmail.com

Institute of Geophysics NAS of Ukraine,  
32, Palladin avenue, Kiev, 03142, Ukraine.

**Relevance of the research.** In recent decade, regional and global climate has changed significantly due to human activities, which became comparable with natural processes. The electric field of atmosphere can serve as an indicator of anthropogenic impact, as the technical and economic environment of cities results in global deviations and modification of natural physical fields. Therefore, there is no doubt in the necessity to study the influence of the atmospheric electric field on distribution of meteorological parameters, since it allows us to reveal qualitatively the «thin» atmospheric stratification structure of the electric field and its change owing to anthropogenic impact.

**The aim of the research** is to consider the morphological stratification of cloud formations by the atmospheric electric field in the period of the active and quiet sun. This approach allows us to clarify qualitatively the mechanism of change in water vapor condensation (on the example of clouds) by the solar activity change as the decrease in the number of excited molecules owing to different ionization of the atmosphere, as well as to build a physical theory of anthropogenic load from industrial plants on the atmosphere and climate.

**Research subject:** the electric field of the atmosphere, clouds.

**Research technique:** detailed statistical analysis of the data on an aircraft sounding during the International Geophysical Year and the International Geophysical Cooperation in 1958–1964.

**Results.** The author has obtained the estimations of radiation cross-sections for the molecules of the standard atmosphere and the condensed phase (cloud aerosols) in geometric approximation. They show that when the characteristic radius is equal to  $\bar{r}=10^{-3}$  cm the ionization of the condensed phase is commensurate with the background ionization. The paper introduces the correlative relationship between average water content of clouds and vertical electric field. The analysis of the results demonstrates that the average annual distribution of water content correlates strongly with the average vertical distribution of the electric field in this region. Using the methods of the detailed statistical analysis the author revealed the relationship between the height of cloud formation and the electric field of the atmosphere. It is shown that the repetition frequency of a cloud lower boundary demonstrates the high coincidence with local sites of neutrality of a bulk charge density for the same latitude.

### Key words:

Electric stratification, clouds, ionization, solar activity, climate.

### REFERENCES

1. Khvorostyanov V.I., Curry J.A. *Thermodynamics, kinetics, and microphysics of clouds*. New York, Cambridge U. Press, 2014. 782 p.
2. *Handbook of weather, climate and water. Dynamics, Climate, Physical Meteorology, Weather Systems, and Measurements*. Eds. T.D. Potter, B.R. Colman. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2003. 974 p.
3. Thomson J.J., Thomson G.P. *Conduction of electricity through gases*, 3<sup>rd</sup> ed. Cambridge, Cambridge University Press, 1928. 192 p.
4. Obolensky V.N. Rol ionov, neytralnykh i zaryazhenykh pylinok i khimicheskii aktivnykh yader pri obrazovanii oblakov i tumanov [The part played by the ions, by the neutral and charged dust particles and chemical active nuclei in formation of clouds and fogs]. *Zhurnal geofiziki*, 1934, vol. 4, no. 1, pp. 90–103.
5. Rusanov A.I., Kuni F.M. Reformulation of the thermodynamic theory of nucleation on charged particles. *Journal Colloid Interface Science*, 1984, vol. 100, no. 1, pp. 264–277.
6. Yu F. Modified Kelvin–Thomson equation considering ion-dipole interaction: comparison with observed ion-clustering enthalpies and entropies. *Journal Chemical Physics*, 2005, vol. 122, pp. 084503–1–084503–8.
7. Levdanski V.V., Dragun V.L., Smolik J., Zdimal V., Moravec P. Influence of surface effects in vapor condensation on a nanodimensional aerosol particle having an electric charge. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2007, vol. 80, no. 1, pp. 57–63.
8. WMO. *Atmospheric Ozone 1985: Assessment of our understanding in the processes controlling its present distribution and change*. WMO, report no. 16. Geneva, 1150 p.
9. Vostrikov A.A., Dubov D.Yu. Absolute cross sections of electron attachment to molecular clusters. Part II: Formation of  $(\text{H}_2\text{O})_N^-$ ,  $(\text{N}_2\text{O})_N^-$ ,  $(\text{N})_N^-$ . *Technical Physics*, 2006, vol. 51, no 12, pp. 1537–1552.
10. Smirnov B.N. *Vozbuzhdennyye atomy* [Excited atoms]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 232 p.
11. Degtyarev V.S., Tuchkov G.A., Tyutin A.A. Rezultaty raketnykh izmereniy UF-izlucheniya v nizhney mezosfere i stratosfere [Results of jet measurements UV-radiation in lower mesosphere and stratosphere]. *Rasprostraneniye radiovoln i fizika atmosfery* [Propagation of radio-waves and physics of atmosphere]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. pp. 211–214.
12. Bragin Yu. A. Issledovaniya znaka prostranstvennogo zaryada atmosfery do vysoty 86 km [Investigation of a volume charge sign of atmosphere up to the altitude of 86 km]. *Kosmicheskie issledovaniya*, 1969, vol. 5, no. 3, pp. 465–467.
13. Bragin Yu.A., Shamahov B.F. Pryamye issledovaniya znaka prostranstvennogo zaryada atmosfery nizhe 50 km [Full-scale investigation of a volume charge sign of atmosphere lower 50 km]. *Kosmicheskie issledovaniya*, 1969, vol. 7, no. 5, pp. 741–746.
14. Bragin Yu.A., Tyutin A.A., Kochev A.A., Tyutin A.A. Pryamue izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya atmosfery do 80 km [Direct measurement of the atmospheric vertical electric field intensity up to 80 km]. *Kosmicheskie issledovaniya*, 1974, vol. 12, no. 2, pp. 302–308.



15. Stolzenburg M., Marshall T.C., Krehbiel P.R. Initial electrification to the first lightning flash in New Mexico thunderstorms. *Journal of geophysical research: Atmospheres*, 2015, vol. 120, no. 21, pp. 11,253–11,276.
16. Leblanc F., Aplin K.L., Yair Y., Harrison R.G. Lebreton J.P., Blanc M. *Planetary Atmospheric Electricity*. London, Springer, 2008. 535 p.
17. Bely T.A., Zelenin Yu.A. Elektrostatische stratifikatsiya globalnoy oblachnoy sistemy samosoglasovannym polem metastabilnoy elektronno-ionnoy podsystemy atmosfery [Electrostatic stratification of global cloud system by self-consistent field of metastable electronic-ionic subsystem of the atmosphere]. *Geofizicheskii zhurnal*, 2013, vol. 35, no. 2, pp. 111–126.
18. Bely T.A., Zelenin Yu.A. Analiticheskoe issledovanie prirody sootvetstviya elektrostaticheskoy i oblachnoy stratifikatsii atmosfery [Analytical studies of the nature of correspondence between electrostatic and cloudy stratification of atmosphere]. *Geofizicheskii zhurnal*, 2013, vol. 35, no. 4, pp. 140–153.
19. *Materialy nablyudeniya napryazhennosti elektricheskogo polya atmosfery na razlichnykh vysotakh po dannym samoletnogo zondirovaniya v period mezhdunarodnogo geofizicheskogo goda i mezhdunarodnogo geofizicheskogo sotrudnichestva 1958–1959 gg.* [Observation data of the atmosphere electric field at different heights according to aircraft sounding during the International Geophysical Year and International Geophysical Cooperation 1958–1959]. Ed. by I.M. Imyanitov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1963. 339 p.
20. *Materialy nabludeniya napryazhennosti elektricheskogo polya atmosfery na razlichnykh vysotakh 1964* [The data of measurements of electric field strength of the atmosphere at various altitudes 1964]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1965. 69 p.
21. *Fluktuatsii elektromagnitnogo polya Zemli v diapazone SNCH* [Fluctuations of the earth magnetic field in ULF band]. Ed. by M.S. Aleksandrov. Moscow, Nauka Publ., 1972. 195 p.
22. Imyanitov I.M., Chubarina E.V. *Elektrichestvo svobodnoy atmosfery* [Electricity of the free atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1965. 240 p.
23. Oraevsky A.N. Sushchestvuet li kollektivnyy dielektrik? [Is there a collective dielectric resonance?]. *Pisma v ZhETF*, 2003, vol. 78, no. 1, pp. 8–10.
24. Turik A.V., Radchenko G.S., Chernobabov A.I., Turik S.A. Dielektricheskaya pronitsaemost polimernykh matrits, soderzhashchikh izolirovannyye vklyucheniya: gigantskoe dielektricheskoe usilenie vmesto kollektivnogo rezonansa [Dielectric permeability of polymer matrices containing isolated inclusions: giant dielectric enhancement instead of collective resonance]. *Pisma v ZhETF*, 2004, vol. 79, no. 9, pp. 512–514.
25. Murillo M.S., Bergeson S.D. Ultracold neutral plasmas well into the strongly coupled regime. *Advances in atomic, molecular, and optical physics*, 2015, vol. 64, pp. 223–271.
26. Teixeira R.C., Hermann-Avigliano C., Nguyen T.L., Cantat-Moltrrecht T., Raimond J.M., Haroche S., Gleyzes S., Brune M. Microwave probe dipole blockade and van der Waals forces in a cold rydberg gas. *Physical review letters*, 2015, vol. 115, no. 1–3, pp. 013001–013005.
27. *Tablitsy fizicheskikh velichin. Spravochnik* [Tables of physical constants]. Ed. by I.K. Kikoin. Moscow, Atomizdat Publ., 1976. 1008 p.
28. Qi X.M., Ding A.J., Nie W., Petäjä T., Kerminen V.-M., Herrmann E., Xie Y.N., Zheng L.F., Manninen H., Aalto P., Sun J.N., Xu Z.N., Chi X.G., Huang X., Boy M., Virkkula A., Yang X.-Q., Fu C.B., Kulmala M. Aerosol size distribution and new particle formation in the western Yangtze River Delta of China: 2 years of measurements at the SORPES station. *Atmospheric chemistry and physics*, 2015, vol. 15, no. 21, pp. 12445–12464.
29. Golubkov G.V., Golubkov M.G., Karpov V.I. Microwave radiation of the atmosphere induced by a pulsed gamma source. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2011, vol. 5, no. 3, pp. 406–412.
30. Bespalov D.P., Devyatkin A.M., Dovgalyuk Yu.A., Kondratyuk V.I., Kuleshov Yu.V., Svetlova T.P., Suvorov S.S., Timofeev V.I., Atlas oblakov [Cloud atlas]. St-Petersburg, DrART Publ., 2011. 248 p.
31. Alves L.L., Coche P., Ridenti M.A., Guerra V. Electron scattering cross sections for the modelling of oxygen-containing plasmas. *The European physical journal D*, 2016, vol. 70, no. 6, pp. 1–9.
32. Ardon-Dryer K., Huang Y.-W., Cziczó D.J. Laboratory studies of collection efficiency of sub-micrometer aerosol particles by cloud droplets on a single-droplet basis. *Atmospheric chemical physics*, 2015, vol. 15, no. 16, pp. 9159–9171.
33. Galadzhny N.M., Zatonvskiy A.L., Podgurskaya V.N., Polovina I.P. Statisticheskie kharakteristiki vodnosti sloistoobraznykh oblakov na Ukraine [Statistical characteristics of water content of stratiform clouds in Ukraine]. *Trudy UHMI*, 1965, no. 51, pp. 97–105.
34. Ponomarev Yu.N., Klimkin A.V., Kozlov A.S., Kolosov V.V., Krymskiy G.F., Kuryak A.N., Malyshkin S.B., Petrov A.K. Issledovaniya kondensatsii peresushenogo vodyanogo para pri ionizatsii atmosfery i soputstvuyushchego kharakteristicheskogo IR-izlucheniya [Studies of condensation of supersaturated water vapor associated with atmospheric ionization and its accompanying characteristic IR emission]. *Solnechno-zemnaya fizika*, 2002, no. 21, pp. 58–61.
35. Sekimoto K., Takayama M. Mass Spectrometric Study of Negative Atmospheric Ion Water Clusters Formed by Atmospheric Pressure Corona Discharges. *Bunseki Kagaku*, 2013, vol. 62, no. 11, pp. 955–963.

Received: 29 August 2016.

#### Information about the authors

**Taras A. Bely**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Geophysics NAS of Ukraine.