

# Нуклеационные всплески в атмосфере бореальной зоны Западной Сибири. Часть II. Скорости образования и роста наночастиц

М.Ю. Аршинов<sup>1</sup>, Б.Д. Белан<sup>1</sup>, Д.К. Давыдов<sup>1</sup>, А.В. Козлов<sup>1</sup>,  
А.С. Козлов<sup>2</sup>, В.Г. Аршинова<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН  
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3

Поступила в редакцию 20.05.2015 г.

Приводится анализ счетного распределения атмосферных наночастиц с целью расчета скоростей образования и роста частиц во время нуклеационных всплесков, наблюдаемых в приземном слое атмосферы Западной Сибири. Расчеты показали, что за период с марта 2010 г. по август 2014 г. включительно скорости образования варьировали от 0,1 до 3,55 см<sup>-3</sup> · с<sup>-1</sup>, а скорости роста — от 0,26 до 53,04 нм · ч<sup>-1</sup>. Результаты длительных непрерывных наблюдений, проведенных в последние годы на двух сибирских станциях мониторинга атмосферы, указывают на их схожесть с повторяемостью и характеристиками нуклеационных всплесков, регистрируемых в других районах бореального пояса. Полученные статистические данные о нуклеационных всплесках могут быть использованы при моделировании климатических изменений и для развития методов их идентификации на глобальном уровне с использованием спутниковых данных.

**Ключевые слова:** нуклеационные всплески, образование новых частиц, скорость образования, скорость роста, наночастицы; nucleation bursts, new particle formation, formation rate, growth rate, nanoparticles.

## Введение

К важным явлениям, связанным с системой атмосферного аэрозоля в целом, относится образование новых атмосферных частиц (наночастиц) из газовой фазы. Оно состоит из сложной цепочки непрерывно протекающих процессов, таких как непосредственное образование стабильных кластеров размером  $\approx 1$  нм из газов-предшественников аэрозоля (нуклеация), их дальнейший рост и одновременное удаление за счет коагуляции на более крупных аэрозольных частицах, присутствующих в атмосфере. Несмотря на то что первое сообщение об обнаружении образования аэрозольных частиц *in situ* в атмосфере было сделано Aitken более 100 лет назад [1], такое явление, как нуклеационные всплески (НВ), было открыто сравнительно недавно. На данный момент известно, что НВ регистрируются достаточно часто в различных регионах земного шара [2–9].

В предыдущей работе [10] нами были проведены идентификация и классификация нуклеационных всплесков, наблюдающихся в приземном слое атмосферы Западной Сибири, на основе чего была получена сезонная зависимость их повторяемости в нашем регионе.

В настоящей статье остановимся на анализе скоростей образования и роста частиц во время НВ, классифицированных нами ранее [10].

## 1. Образование наночастиц в атмосфере

Анализ результатов исследований в данной области свидетельствует о том, что к образованию наночастиц в атмосфере приводят несколько типов процессов [11]. В континентальном пограничном слое атмосферы чаще всего это происходит во время так называемых региональных нуклеационных всплесков. Во время таких событий рост образующихся частиц наблюдается в течение всего дня, приводя к увеличению счетной концентрации аэрозольных частиц на расстоянии сотен километров. Чаще всего региональные всплески наблюдаются в районах с обширными лесными массивами [6, 7, 12–14], в сельской

\* Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Денис Константинович Давыдов (denic@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Александр Сергеевич Козлов (kozlov@kinetics.nsc.ru); Виктория Геннадьевна Аршинова (arvi@iao.ru).

местности и других удаленных континентальных районах [4, 5, 15–17].

Интенсивные, но более локализованные всплески образования частиц наблюдаются в морском пограничном слое атмосферы прибрежных районов Европы и Северной Америки [8, 9, 18]. В пограничном слое над океанами (на большом удалении от суши) образование наночастиц встречается крайне редко [19]. Несмотря на то что события НВ, наблюдаемые в океанических районах вблизи Антарктиды [20], имеют признаки региональных, авторы [11] делают вывод, что в целом образование наночастиц в морском пограничном слое атмосферы менее интенсивно, чем над континентальными районами.

Локализованное образование наноаэрозолей может также наблюдаться в шлейфах различных антропогенных выбросов, содержащих диоксид серы [21–23]. В районе крупных промышленных центров, например таких как «Большой Норильск», оно может приобретать региональный масштаб.

Довольно часто образование наночастиц наблюдается в свободной атмосфере, особенно в верхней тропосфере [24–27] и в районах истечения облаков вертикального развития [28–30].

## 2. Основные характеристики нуклеационных всплесков

Скорости образования и роста аэрозольных частиц принято считать основными характеристиками нуклеационных всплесков [2, 11]. Первая из них — это количество частиц, образующихся в единице объема за единицу времени (частиц  $\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ , чаще записываемое как  $\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ). В сущности говоря, она не является скоростью нуклеации как таковой, а лишь несет информацию о том, с какой скоростью в атмосфере появляются частицы минимально детектируемого размера, обычно — несколько нанометров (в нашем случае 3 нм). Скорость роста частиц ( $\text{нм} \cdot \text{ч}^{-1}$ ) говорит о том, насколько быстро образующиеся частицы растут, достигая более крупных размеров, например диапазона облачных ядер конденсации (ОЯК).

Эти характеристики НВ могут быть определены достаточно простым способом из эволюции спектра размеров аэрозольных частиц во время нуклеационных всплесков 1-го и 2-го типов [6, 10, 31]. На рис. 1 (цв. вклейка) приведен пример суточной динамики распределения аэрозольных частиц по размерам во время НВ 1-го типа, позволяющий определить обе эти характеристики. Вычисление скоростей образования наночастиц из данных натурных наблюдений является относительно простым, тогда как определение скоростей роста осложняется возможным влиянием неоднородностей воздушных масс во время проведения измерений и другими факторами, которые могут привести к ложной обработке кажущегося роста частиц из измеренного спектра размеров [11].

В литературе можно найти целый ряд методов, разработанных для расчета скоростей образования и роста аэрозолей из данных наблюдений, начиная

с простых методов визуального анализа и подбора эмпирической зависимости [6, 32, 33] и заканчивая сложными численными программами [33–35].

Согласно обзору [2] скорость образования 3-нм частиц, наблюдаемая во время региональных НВ, варьирует в пределах от 0,01 до  $10 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ , а в городах может достигать и  $100 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ . В отдельных локальных случаях, например в прибрежных районах и шлейфах промышленных выбросов, скорости могут достигать  $10^4$ – $10^5 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Большая же часть скоростей роста образующихся частиц лежит в диапазоне от  $1$ – $10 \text{ нм} \cdot \text{ч}^{-1}$  [2], из чего следует, что для достижения ими диапазона размеров ОЯК требуется времени от половины до трех суток. Медленный рост ( $0,1$ – $1 \text{ нм} \cdot \text{ч}^{-1}$ ) наблюдается, как правило, в удаленных фоновых районах [12], а интенсивный ( $> 10 \text{ нм} \cdot \text{ч}^{-1}$ ) — в загрязненных [21, 23], периодически достигая  $100 \text{ нм} \cdot \text{ч}^{-1}$  в шлейфах промышленных выбросов. Высокие скорости роста (вплоть до  $200 \text{ нм} \cdot \text{ч}^{-1}$ ) также могут отмечаться в прибрежных районах [9, 36].

### 2.1. Оценка скорости образования наночастиц в атмосфере бореальной зоны Западной Сибири

Согласно теории нуклеации и данным лабораторных экспериментов, принято считать, что в результате нуклеации образуются критические кластеры (термодинамически устойчивые зародыши) размером примерно 1 нм. Приборов, способных измерять концентрацию кластеров, на протяжении длительного времени не было. До 2004 г. можно было найти лишь одно сообщение об опыте опосредованного измерения кластеров путем регистрации частиц в диапазоне 2,7–4 нм [37]. Только в 2004 г. была опубликована первая статья, в которой приводятся данные о лабораторной установке, способной регистрировать заряженные частицы размером от 1,2 нм [38], которая была создана на основе укрупнителя частиц PSM (Particle Size Magnifier), разработанного еще в 1984 г. [39]. И лишь в 2011 г. был анонсирован его первый коммерческий вариант, созданный в Хельсинском университете совместно с фирмой AIRMODUS [40], который позволяет детектировать частицы от 1 нм.

Несмотря на достигнутые технологические успехи в этой области, укрупнитель PSM остается малодоступным для большинства исследователей из-за его высокой стоимости. Поэтому измерения ограничены преимущественно нижним пределом обнаружения частиц размером  $D_p$  2–3 нм, и данные о скорости нуклеации как таковой в приведенных выше работах по нуклеационным всплескам в атмосфере не приводятся, а как правило, указываются скорости образования частиц размером выше предела обнаружения используемого оборудования. Чаще всего для вычисления скорости образования наночастиц  $J_D$  в атмосфере используют подход расчета прироста концентрации частиц  $\Delta N$  в диапазоне от минимально детектируемого размера  $D_{\min}$  до  $D_{\max}$  за промежуток времени  $\Delta t$  [2]:

$$\frac{\Delta N_{D_{\min}, D_{\max}}}{\Delta t} \Big|_{\text{набл}} = J_D - \frac{\Delta N_{D_{\min}, D_{\max}}}{\Delta t} \Big|_{\text{самокоагуляция}} - \frac{\Delta N_{D_{\min}, D_{\max}}}{\Delta t} \Big|_{\text{коагуляция}} - \frac{\Delta N_{D_{\min}, D_{\max}}}{\Delta t} \Big|_{\text{перенос}}, \quad (1)$$

где  $N_{D_{\min}, D_{\max}}$  – общая счетная концентрация частиц в диапазоне размеров от  $D_{\min}$  до  $D_{\max}$ ;  $D_{\max}$  – максимальный размер, который может быть достигнут за счет роста в течение времени  $\Delta t$ . Второй и третий члены правой части уравнения представляют потери за счет самокоагуляции и коагуляции на частицах размерами, превышающими  $D_{\max}$ . Последний член учитывает потери за счет переноса воздушных масс. Поскольку условием, благоприятствующим нуклеационным всплескам, является наличие ясного неба, малоградиентного барического поля и низкой суммарной поверхности аэрозоля, присутствующего в атмосфере, то в расчетах скорости образования наночастиц последними членами можно пренебречь, и выражение (1) приобретает следующий вид [2]:

$$J_D \approx \frac{\Delta N_{D_{\min}, D_{\max}}}{\Delta t} \Big|_{\text{набл}}. \quad (2)$$

Несмотря на то что эта формула является упрощенной, она нашла широкое применение и использовалась в большинстве исследований НВ, упомянутых выше.

Согласно принципам классификации нуклеационных всплесков, изложенным в [6, 31] и использованным нами в [10] при определении статистики их повторяемости в Сибири, для расчетов скорости образования и роста наночастиц мы использовали эпизоды только 1-го и 2-го типов.

В качестве  $D_{\max}$  принимался размер частиц, равный 25 нм. Промежуток времени  $\Delta t$  определял-

ся в каждом случае индивидуально от начала роста концентрации частиц  $D_p < 25$  нм до наступления ее максимума (см. рис. 1, цв. вклейка).

Результаты расчетов показали, что среднее значение скорости образования наночастиц за весь период наблюдений составило  $1,7 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$  (медиана =  $1,13 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ) на TOR-станции и  $0,88 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$  (медиана =  $0,69 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ) в районе обсерватории «Фоновая». Такие значения наиболее близко соответствуют характеристикам нуклеационных всплесков, наблюдаемых на фоновой станции SMEAR-II (Hyutiälä, Финляндия), расположенной в бореальном лесу [5, 8]. Средние и медианные значения скорости образования наночастиц, рассчитанные для каждого из месяцев, приведены в табл. 1.

Если обратиться к сезонному ходу скорости образования (рис. 2), то видно, что для обсерватории «Фоновая» он идентичен сезонной зависимости повторяемости нуклеационных всплесков [10]. Для TOR-станции картина несколько отличается из-за наличия максимума в июле и более высоких скоростей образования в целом. Однако при рассмотрении исходных данных, представленных на рис. 3, можно увидеть, что в общем сезонный ход скорости образования подобен на обеих станциях просто из-за более низкой повторяемости НВ летом, несколько эпизодов с высокой скоростью образования, зарегистрированных на TOR-станции, привели к появлению июльского максимума в средних значениях. Такой же факт был зафиксирован на станции Pallas в Финляндии [7]. Поэтому такие случаи требуют дополнительного анализа для выявления причин, приведших к этой аномалии. Явной зависимости  $J_D$  от типа нуклеационного всплеска не прослеживается (рис. 3), поскольку для обоих типов характерно изменение величины  $J_D$  от нескольких десятых частиц в  $\text{см}^3$  за секунду до  $10 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Таблица 1

Минимальные, максимальные, средние и медианные значения скорости образования наночастиц  $J_D$  ( $\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ), рассчитанные для НВ за период с марта 2010 г. (для TOR-станции) и с мая 2011 г. (для обсерватории «Фоновая») по август 2014 г. включительно

Месяц	TOR-станция				Обсерватория «Фоновая»			
	min	max	среднее	медиана	min	max	среднее	медиана
I	0,81	2,26	1,54	1,54	0,30	0,67	0,47	0,44
II	0,40	1,95	0,98	0,82	0,22	0,66	0,34	0,30
III	0,11	6,93	1,18	0,72	0,23	1,96	0,79	0,67
IV	0,24	5,08	1,47	1,28	0,22	2,71	1,10	0,93
V	0,12	10,63	2,11	1,55	0,46	3,50	1,39	1,31
VI	0,33	7,51	2,20	1,73	0,32	1,54	0,74	0,74
VII	0,44	9,56	3,55	3,03	0,25	2,89	1,04	0,77
VIII	0,26	7,20	2,09	1,24	0,38	1,78	0,96	0,91
IX	0,17	4,02	1,29	0,89	0,27	1,93	0,87	0,75
X	0,20	2,58	1,05	0,96	0,15	2,04	0,57	0,41
XI	0,22	1,26	0,70	0,82	0,10	0,54	0,32	0,31
XII	0,60	3,65	2,40	2,67	0,19	0,19	0,19	0,19

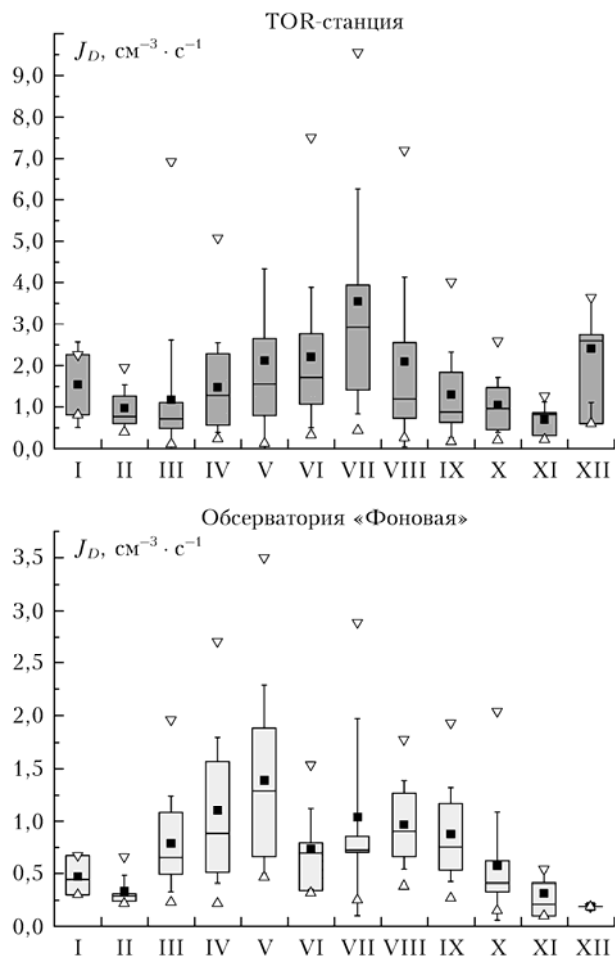


Рис. 2. Диаграмма среднего сезонного хода скорости образования наночастиц  $J_D$  на TOR-станции и в районе обсерватории «Фоновая»: горизонтальная линия внутри прямоугольника – медиана; черные квадратики – среднее значение; нижняя и верхняя границы прямоугольника – 1-й и 3-й квартили соответственно; нижний и верхний края вертикальных отрезков – среднеквадратическое отклонение;  $\Delta$  и  $\nabla$  – минимальное и максимальное значение

## 2.2. Оценка скорости роста наночастиц в атмосфере бореальной зоны Западной Сибири

Роль конденсационного роста образующихся частиц, являющегося второй из основных характеристик НВ, состоит в том, что по мере увеличения размера частиц скорость потерь за счет межмодовой коагуляции и самокоагуляции ослабевает, позволяя им достичь размеров моды Айткена и даже аккумуляционной фракции аэрозоля. С другой стороны, интенсивная конденсация сильно истощает содержание аэрозольных прекурсоров в воздухе, тем самым подавляя дальнейшую нуклеацию.

Авторы обзора [2] предлагали оценивать скорость роста частиц по эволюции среднего диаметра  $D_{Pmean}$  популяции частиц нуклеационной моды:

$$GR = \frac{\Delta D_{Pmean}}{\Delta t}, \quad (3)$$

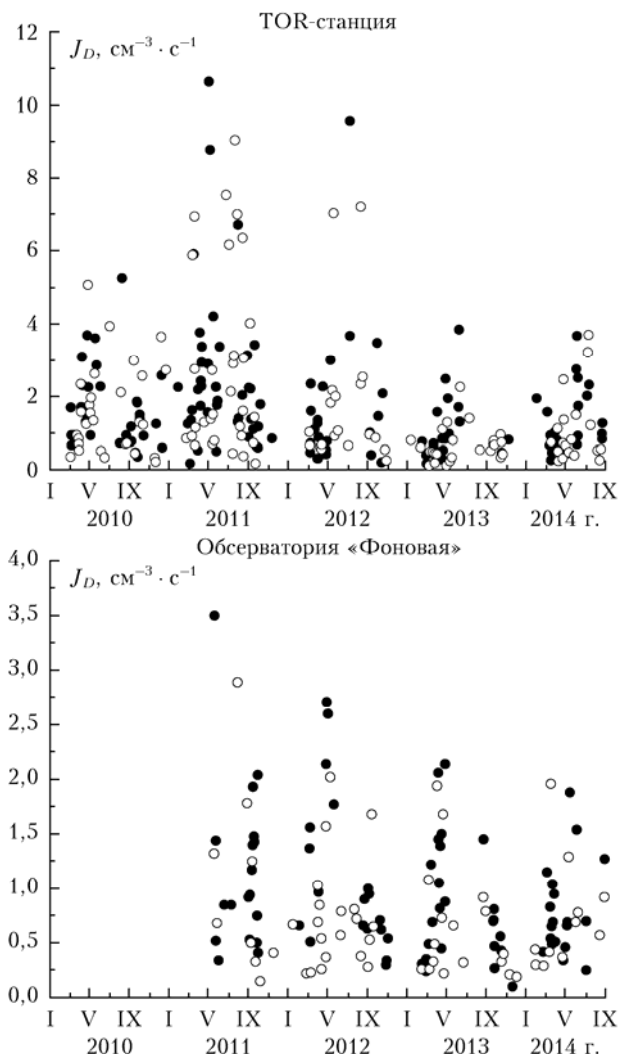


Рис. 3. Временная диаграмма скорости образования наночастиц  $J_D$  на TOR-станции и в районе обсерватории «Фоновая» во время нуклеационных всплесков 1-го (●) и 2-го типов (○)

где  $D_{Pmean}$  – средний диаметр частиц в диапазоне размеров от  $D_{min}$  до  $D_{max}$ . Однако они же делают примечание, что выражение (3) неприменимо в случае продолжительной интенсивной нуклеации, наблюдаемой во время роста частиц. Поэтому в расчетах чаще всего  $D_{Pmean}$  заменяют среднегеометрическим диаметром частиц  $D_{Pg}$  всей популяции частиц нанометрового диапазона [4, 6, 7, 23, 31], исходя из свойств логнормального распределения аэрозольных частиц, согласно которому  $D_{Pg}$  одновременно является и медианным, т.е. большинство частиц сосредоточено вблизи данного размера. Тогда скорость роста можно оценить следующим образом:

$$GR = \frac{\Delta D_{Pg}}{\Delta t}. \quad (4)$$

При расчетах  $GR$  по формуле (4) промежутком времени  $\Delta t$  выбирается на «линейном» участке увеличения  $D_{Pg}$  во время нуклеационного всплеска 1-го или 2-го типов (рис. 4).

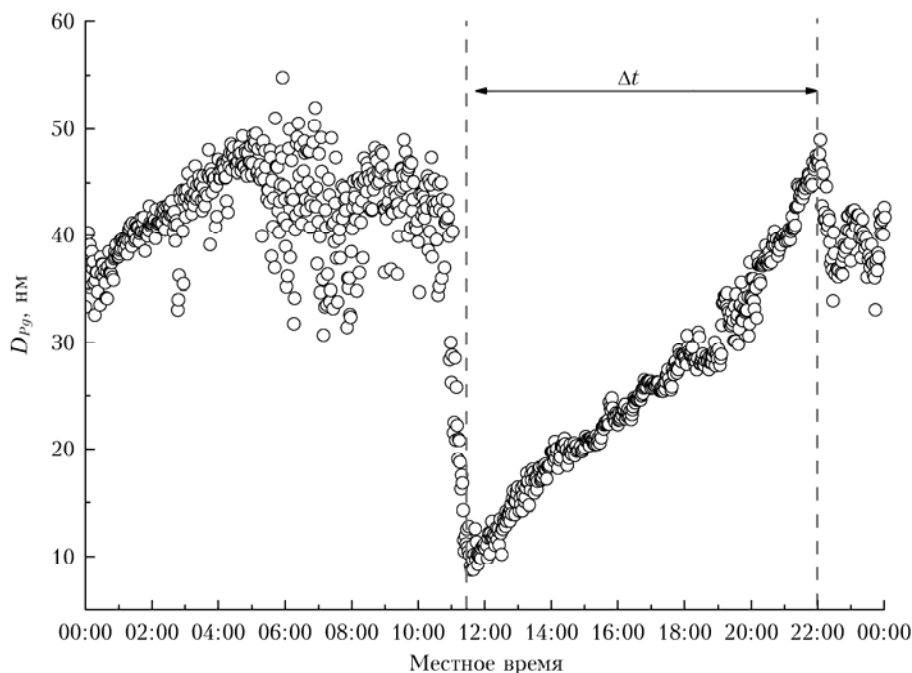


Рис. 4. Пример изменения среднегеометрического диаметра частиц  $D_{Pg}$  во время эпизода НВ

Согласно результатам обработки данных, средняя скорость роста наночастиц за весь период наблюдений составила  $6,5 \text{ нм} \cdot \text{ч}^{-1}$  (медиана =  $5,0 \text{ нм} \cdot \text{ч}^{-1}$ ) на TOR-станции и  $8,3 \text{ нм} \cdot \text{ч}^{-1}$  (медиана =  $6,4 \text{ нм} \cdot \text{ч}^{-1}$ ) в районе обсерватории «Фоновая». Получается, что в отличие от скоростей образования средние скорости роста наночастиц, наоборот, несколько выше в районе обсерватории «Фоновая». Средние и медианные значения скорости роста наночастиц  $GR$ , рассчитанные для каждого из месяцев, приведены в табл. 2. Полученные результаты показывают, что на обеих станциях порядок величины  $GR$  находится на одном уровне, соответствуя значениям, наблюдаемым и в других регионах Земли [2, 7]. В годовом ходе  $GR$  (рис. 5 и 6) проявляются более высокие значения весной и летом, а зимой – более низкие, за исключением февраля и декабря на TOR-станции, когда,

по всей видимости, сказывается антропогенное влияние г. Томска. В целом же картина повторяемости нуклеационных всплесков и годовой ход скорости роста наночастиц говорят в пользу гипотезы о том, что первоначальный рост прежде всего обусловлен фотоокислением биогенных летучих органических соединений, особенно в период возобновления фотосинтеза [41], продукты которых способны конденсироваться на образующихся кластерах. Несмотря на то что абсолютные скорости роста, наблюдаемые в Сибири, несколько выше значений, полученных на скандинавских станциях [7], большинство характерных особенностей нуклеационных всплесков идентичны в обоих регионах. Авторы [7] также указывают на то, что скорости роста, наблюдаемые на более южных станциях, выше, чем на северных, подкрепляя вышеупомянутую гипотезу наличием более мощных

Таблица 2

Минимальные, максимальные, средние и медианные значения скорости роста наночастиц  $GR$  ( $\text{нм} \cdot \text{ч}^{-1}$ ), рассчитанные для НВ за период с марта 2010 г. (для TOR-станции) и с мая 2011 г. (для обсерватории «Фоновая») по август 2014 г. включительно

Месяц	TOR-станция				Обсерватория «Фоновая»			
	min	max	среднее	медиана	min	max	среднее	медиана
I	1,89	4,13	3,01	3,01	1,34	3,80	2,48	2,29
II	1,38	24,57	8,07	3,39	0,91	6,56	3,08	2,91
III	1,30	12,51	4,82	3,38	1,59	9,50	5,18	4,55
IV	0,87	24,59	5,97	4,88	2,40	53,04	10,64	7,08
V	1,31	23,80	7,99	6,05	2,88	22,29	11,64	11,77
VI	1,91	19,31	8,76	7,46	2,01	22,11	8,35	6,54
VII	1,22	29,18	6,70	3,70	4,25	26,33	12,16	10,24
VIII	0,26	27,68	6,86	5,30	1,35	27,37	8,53	7,55
IX	1,41	16,17	5,66	4,33	1,79	20,10	8,20	7,20
X	1,61	10,70	5,09	4,87	2,03	27,52	9,41	6,22
XI	0,34	6,65	3,87	5,03	3,03	4,86	3,84	3,74
XII	4,96	22,99	11,12	8,27	7,15	7,15	7,15	7,15

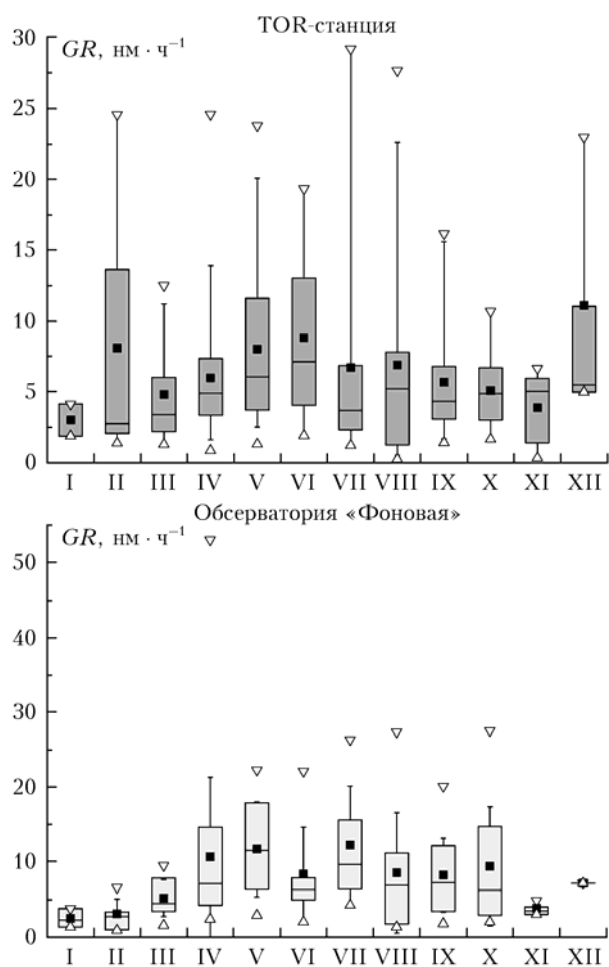


Рис. 5. Диаграмма среднего сезонного хода скорости роста наночастиц  $GR$  на TOR-станции и в районе обсерватории «Фоновая»: горизонтальная линия внутри прямоугольника – медиана; черные квадратик – среднее значение; нижняя и верхняя границы прямоугольника – 1-й и 3-й квартили соответственно; нижний и верхний края вертикальных отрезков – среднееквадратическое отклонение;  $\Delta$  и  $\nabla$  – минимальное и максимальное значение

источников конденсирующихся газовых прекурсоров аэрозоля. Наши же станции расположены почти на 3–10 град южнее скандинавских, сибирские лесные массивы намного обширнее, соответственно и общий источник биогенных прекурсоров мощнее.

### Заключение

В результате проведенного исследования были проанализированы счетные распределения аэрозольных частиц в соответствии с классификацией и повторяемостью нуклеационных всплесков из [10]. Для расчета скоростей образования и роста наночастиц было выбрано 267 дней НВ 1-го и 2-го типа, наблюдавшихся на TOR-станции, и 138 дней – в районе обсерватории «Фоновая». Анализ показал сходство картины сезонного хода повторяемости НВ, скоростей образования и роста наночастиц, наблюдаемых

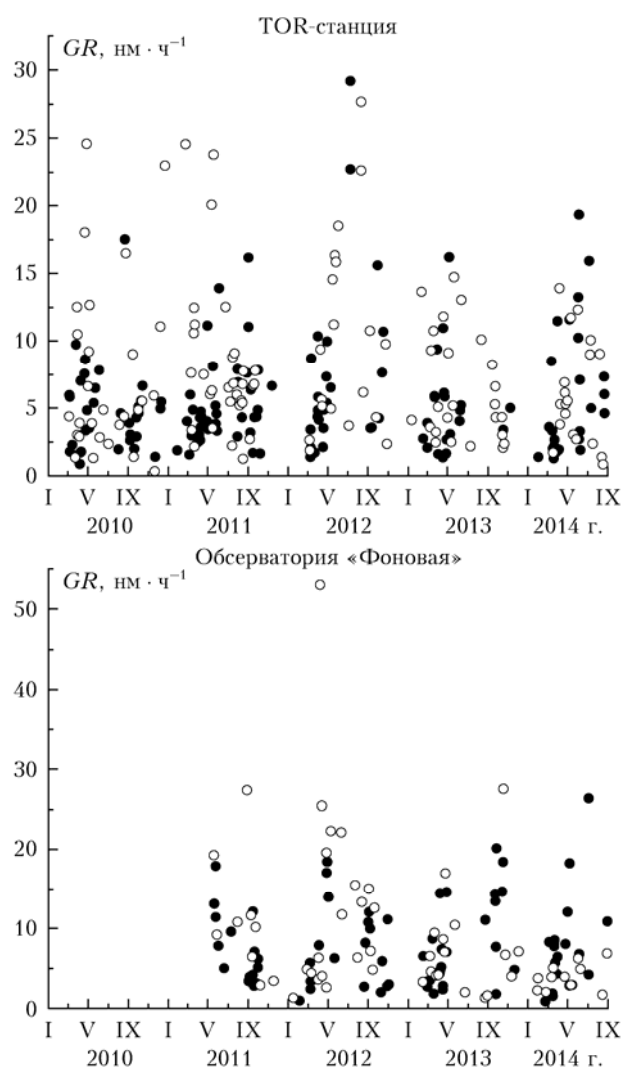


Рис. 6. Временная диаграмма скорости роста наночастиц  $GR$  на TOR-станции и в районе обсерватории «Фоновая» во время нуклеационных всплесков 1-го (●) и 2-го типов (○)

в Сибири, с данными, полученными на скандинавских станциях [7]. Длительные непрерывные наблюдения, проведенные в последние годы на двух сибирских станциях мониторинга атмосферы, подтверждают предположение, сделанное авторами [7], о том, что нуклеационные всплески должны происходить по всему поясу бореальных лесов Северного полушария. Полученные статистические данные о повторяемости НВ и их характеристиках очень важны, поскольку существует потребность в них как при моделировании климатических изменений, так и при развитии методов их идентификации с использованием спутниковых данных [42].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 11-05-00516, 14-05-00590, 14-05-00526) и Сибирского отделения РАН (Междисциплинарный интеграционный проект № 35), программы Президиума РАН № 4, программы ОНЗ РАН № 5.

1. Aitken J.A. On some nuclei of cloudy condensation // Trans. Roy. Soc. Edinburgh. 1998. XXXIX. Pt. I, N 3. P. 15–25.
2. Kulmala M., Vehkamäki H., Petäjä T., Dal Maso M., Lauri A., Kerminen V.-M., Birmili W., McMurry P.H. Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: A review of observations // J. Aerosol Sci. 2004. V. 35, N 2. P. 143–176.
3. Hirsikko A., Nieminen T., Gagné S., Lehtipalo K., Manninen H.E., Ehn M., Hörrak U., Kerminen V.-M., Laakso L., McMurry P.H., Mirme A., Mirme S., Petäjä T., Tammeth H., Vakkari V., Vana M., Kulmala M. Atmospheric ions and nucleation: A review of observations // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11, N 2. P. 767–798.
4. Suni T., Kulmala M., Hirsikko A., Bergman T., Laakso L., Aalto P.P., Leuning R., Cleugh H., Zegelin S., Hughes D., van Gorsel E., Kitchin M., Vana M., Hörrak U., Mirme S., Mirme A., Sevanto S., Twining J., Tadros C. Formation and characteristics of ions and charged aerosol particles in a native Australian Eucalypt forest // Atmos. Chem. Phys. 2008. V. 8, N 1. P. 129–139.
5. Vakkari V., Laakso H., Kulmala M., Laaksonen A., Mambaso D., Molefe M., Kgabi N., Laakso L. New particle formation events in semi-clean South African savannah // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11, N 7. P. 3333–3346.
6. Dal Maso M., Kulmala M., Riipinen I., Wagner R., Hussein T., Aalto P.P., Lehtinen K.E.J. Formation and growth of fresh atmospheric aerosols: Eight years of aerosol size distribution data from SMEAR II, Hyytiälä, Finland // Boreal Environ. Res. 2005. V. 10, N 5. P. 323–336.
7. Dal Maso M., Sogacheva L., Aalto P., Riipinen I., Komppula M., Tunved P., Korhonen L., Suuruskki V., Hirsikko A., Kurten T., Kerminen V., Lihavainen H., Viisanen Y., Hansson H., Kulmala M. Aerosol size distribution measurements at four Nordic field stations: Identification, analysis and trajectories of new particle formation bursts // Tellus B. 2007. V. 59, N 3. P. 350–361.
8. O'Dowd C.D., Hämeri K., Mäkelä J.M., Kulmala M., Pirjola L., Berresheim H., Jennings S.G., Hansson H.-C., de Leeuw G., Allen A.G., Hewitt C.N., Stroh A., Viisanen Y. A dedicated study of New Particle Formation and Fate in the Coastal Environment (PARFORCE): Overview of objectives and achievements // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107, N 19. P. PAR1-1–PAR1-16. 8108. DOI: 10.1029/2001JD000555.
9. O'Dowd C.D., Yoon Y.J., Junkerman W., Aalto P., Kulmala M., Lihavainen H., Viisanen Y. Airborne measurements of nucleation mode particles I: Coastal nucleation and growth rates // Atmos. Chem. Phys. 2007. V. 7, N 6. P. 1491–1501.
10. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов А.С., Малышкин С.Б., Симоненков Д.В., Антохин П.Н. Нуклеационные всплески в атмосфере бореальной зоны Западной Сибири. Часть I. Классификация и повторяемость // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 9. С. 766–774.
11. Kulmala M., Kerminen V.-M. On the formation and growth of atmospheric nanoparticles // Atmos. Res. 2008. V. 90, N 2–4. P. 132–150.
12. Vehkamäki H., Dal Maso M., Hussein T., Flanagan R., Hyyvärinen A., Lauros J., Merikanto P., Mönkkönen M., Pihlatie K., Salminen K., Sogacheva L., Thum T., Ruuskanen T.M., Keronen P., Aalto P.P., Hari P., Lehtinen K.E.J., Rannik Ü., Kulmala M. Atmospheric particle formation events at Värrö measurement station in Finnish Lapland 1998–2002 // Atmos. Chem. Phys. 2004. V. 4, N 7. P. 2015–2023. DOI: 10.5194/acp-4-2015-2004.
13. Mäkelä J., Aalto J.M., Jokinen P., Pohja V., Nissinen T., Palmroth A., Markkanen S., Seitsonen T., Lihavainen K., Kulmala M. Observations of ultrafine particle formation and growth in boreal forest // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24, N 10. P. 1219–1222.
14. Kulmala M., Maso M.D., Mäkelä J.M., Pirjola L., Väkevä M., Aalto P., Mikkulainen P., Hämeri K., O'Dowd C.D. On the formation, growth and composition of nucleation mode particles // Tellus B. 2001. V. 53, N 4. P. 479–490.
15. Weber R.J., Marti J.J., McMurry P.H., Eisele F.L., Tanner D.J., Jefferson A. Measurements of new particle formation and ultrafine particle growth rates at a clean continental site // J. Geophys. Res. D. 1997. V. 102, N 4. P. 4375–4385.
16. Weber R.J., McMurry P.H., Mauldin L., Tanner D.J., Eisele F.L., Brechtel F.J., Kreidenweis S.M., Kok G.L., Schillawski R.D., Baumgardner D. A study of new particle formation and growth involving biogenic and trace gas species measured during ACE1 // J. Geophys. Res. D. 1998. V. 103, N 13. P. 16385–16396.
17. Weber R.J., McMurry P.H., Mauldin III R.L., Tanner D.J., Eisele F.L., Clarke A.D., Kapustin V.N. New particle formation in the remote troposphere: A comparison of observations at various sites // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26, N 3. P. 307–310.
18. Wen J., Zhao Y., Wexler A.S. Marine particle nucleation: Observations at Bodega Bay, California // J. Geophys. Res. D. 2006. V. 111, N 8. D08207. DOI: 10.1029/2005JD0062102006.
19. Heintzenberg J., Birmili W., Wiedensohler A., Nowak A., Tuch T. Structure, variability and persistence of the submicrometre marine aerosol // Tellus B. 2004. V. 56, N 4. P. 357–367.
20. Koponen I., Virkkula A., Hillamo R., Kerminen V.-M., Kulmala M. Number size distributions and concentrations of the continental summer aerosols in Queen Maud Land, Antarctica // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108, N 18. 4587. DOI: 10.1029/2002JD002939.
21. Yue D.L., Hu M., Zhang R.Y., Wang Z.B., Zheng J., Wu Z.J., Wiedensohler A., He L.Y., Huang X.F., Zhu T. The roles of sulfuric acid in new particle formation and growth in the mega-city of Beijing // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10, N 10. P. 4953–4960.
22. Woo K.S., Chen D.R., Pui D.Y.H., McMurry P.H. Measurements of Atlanta aerosol size distributions: Observations of ultrafine particle events // Aerosol Sci. Technol. 2001. V. 34, N 1. P. 75–87.
23. Wu Z., Hu M., Liu S., Wehmer B., Bauer S., Massling A., Wiedensohler A., Petäjä T., Dal Maso M., Kulmala M. New particle formation in Beijing: Statistical analysis of a 1-year data set // J. Geophys. Res. D. 2007. V. 112, N 9. D09209. DOI: 10.1029/2006JD007406.
24. Schröder F., Kärcher B., Fiebig M., Petzold A. Aerosol states in the free troposphere at northern midlatitudes // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107, N 21. P. 8126–8133.
25. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д. Вертикальное распределение наночастиц в тропосфере континентального района // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 7. С. 547–557.
26. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Paris J.-D., Заде Г.О., Симоненков Д.В. Пространственная и временная изменчивость микродисперсной фракции аэрозоля (наночастиц) на территории Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 12. С. 1015–1023.
27. Paris J.-D., Arshinov M.Yu., Ciais P., Belan B.D., Nédélec P. Large-scale aircraft observations of ultra-fine and fine particle concentrations in the remote Siberian troposphere: New particle formation studies // Atmos. Environ. 2009. V. 43, N 6. P. 1302–1309.
28. Clarke A.D., Eisele F.L., Kapustin V.N., Moore K., Tanner D., Mauldin L., Litchy M., Lienert B., Carrol M.A.,

- Albercook G.* Nucleation in the equatorial free troposphere: Favorable environments during PEM-Tropics // *J. Geophys. Res. D.* 1999. V. 104, N 5. P. 5735–5744.
29. *Clarke A.D., Varner J.L., Eisele F.L., Mauldin R.L., Tanner D., Litchy M.* Particle production in the remote marine atmosphere: Cloud outflow and subsidence during ACE1 // *J. Geophys. Res. D.* 1998. V. 103, N 13. P. 16397–16409.
30. *Tzwohy C.H., Clement C.F., Gundrud B.W., Weinheimer A.J., Campos T.L., Baumgardner D., Brune W.B., Faloona I., Sachse G.W., Vay S.A., Tan D.* Deep convection as a source of new particles in the midlatitude upper troposphere // *J. Geophys. Res. D.* 2002. V. 107, N 21. 4560. DOI: 10.1029/2001JD000323.
31. *Hamed A., Joutsensaari J., Mikkonen S., Sogacheva L., Dal Maso M., Kulmala M., Cavalli F., Fuzzi S., Facchini M.C., Decesari S., Mircea M., Lehtinen K.E.J., Laaksonen A.* Nucleation and growth of new particles in Po Valley, Italy // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7, N 2. P. 355–376.
32. *Heintzenberg J.* Properties of the log-normal particle size distribution // *Aerosol Sci. Technol.* 1994. V. 21, N 1. P. 46–48.
33. *Stolzenburg M.R., McMurry P.H., Sakurai H., Smith J.N., Mauldin III L.R., Eisele F.L., Clement C.F.* Growth rates of freshly nucleated atmospheric particles in Atlanta // *J. Geophys. Res. D.* 2005. V. 110, N 22. P. D22S05.
34. *Verheggen B., Mozurkewich M.* An inverse modelling procedure to determine particle growth and nucleation rates from measured aerosol size distributions // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. V. 6, N 10. P. 2927–2942.
35. *Heintzenberg J., Wehner B., Birmili W.* How to find bananas in the atmospheric aerosol: New approach for analyzing atmospheric nucleation and growth rates // *Tellus B.* 2007. V. 59, N 2. P. 273–282.
36. *O'Dowd C., Hoell C., Becker E.* PARFORCE intensive field campaign results: Particle concentration and low tide // Finnish Association for Aerosol Research. Report Series in Aerosol Science. 2000. V. 48. P. 22–27.
37. *Weber R.J., McMurry P.H., Eisele F.L., Tanner D.J.* Measurement of expected nucleation precursor species and 3–500-nm diameter particles at Mauna Loa Observatory, Hawaii // *J. Atmos. Sci.* 1995. V. 52, N 12. P. 2242–2257.
38. *Sgro L.A., Fernández de la Mora J.* A simple turbulent mixing CNC for charged particle detection down to 1.2 nm // *Aerosol Sci. Technol.* 2004. V. 38, N 1. P. 1–11.
39. *Okuyama K., Kousaka Y., Motouchi T.* Condensational growth of ultrafine aerosol particles in new aerosol size magnifier // *Aerosol Sci. Technol.* 1984. V. 3, N 4. P. 353–366.
40. *Vanhanen J., Mikkilä J., Lehtipalo K., Sipilä M., Manninen H.E., Siivola E., Petäjä T., Kulmala M.* Particle size magnifier for nano-CN detection // *Aerosol Sci. Technol.* 2011. V. 45, N 4. P. 533–542.
41. *Dal Maso M., Hari P., Kulmala M.* Spring recovery of photosynthesis and atmospheric particle formation // *Boreal Environ. Res.* 2009. V. 14, N 4. P. 711–721.
42. *Kulmala M., Arola A., Nieminen T., Riuttanen L., Sogacheva L., de Leeuw G., Kerminen V.-M., Lehtinen K.E.J.* The first estimates of global nucleation mode aerosol concentrations based on satellite measurements // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11, N 21. P. 10791–10801.

*M. Yu. Arshinov, B.D. Belan, D.K. Davydov, A.V. Kozlov, A.S. Kozlov, V.G. Arshinova.* **Nucleation bursts in the atmosphere over boreal zone in West Siberia. Part II. Formation and growth rates of nanoparticles.**

In this paper a number size distribution of atmospheric nanoparticles has been analyzed with a view to estimate particle formation and growth rates during the nucleation bursts observed in the atmospheric surface layer over West Siberia. Estimates showed that during the period from March 2010 to August 2014, inclusively, new particle formation and growth rates ranged from 0.1 to 3.55 cm<sup>-3</sup> · s<sup>-1</sup> and from 0.26 to 53.04 nm · h<sup>-1</sup>, respectively. Results of continuous long-term observations recently carried out at two atmospheric monitoring stations located in Siberia point out a similarity of them with the frequency and main characteristics of nucleation bursts recorded in other regions of the boreal belt. Statistical data on nucleation bursts obtained in our region can be used when modeling the climate change and developing methods of their identification on a global scale with the use of satellite data.



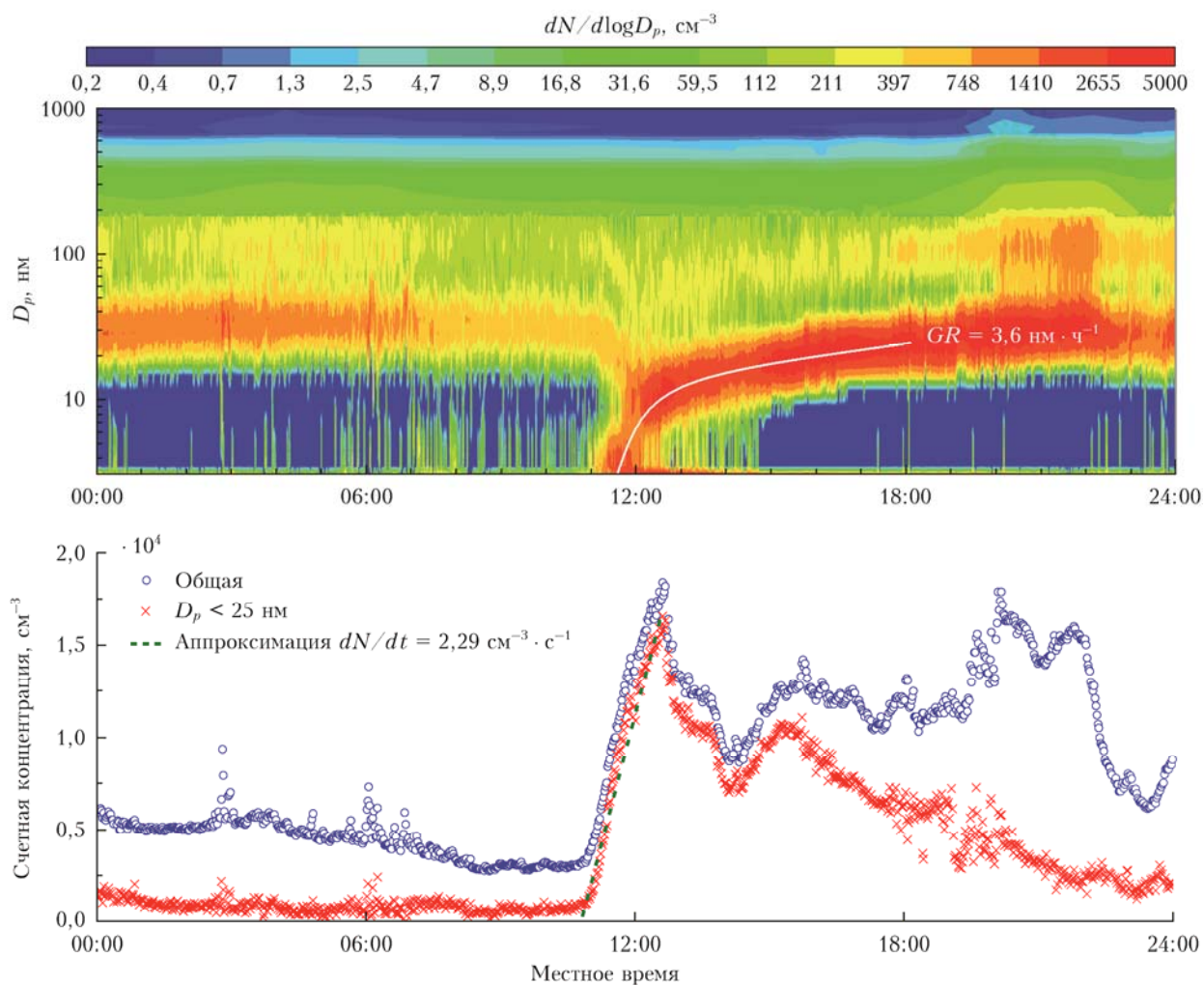


Рис. 1. Типичный эпизод образования и дальнейшего роста атмосферных наночастиц, наблюдающийся на TOR-станции