

СОДЕРЖАНИЕ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ В ЖЕЛЕЗНОМ МЕТЕОРИТЕ СИХОТЭ-АЛИНЬ

А.П.Виноградов, И.К.Задорожный, К.П.Флоренский

В работах ряда авторов [1] было показано, что железные и каменные метеориты содержат заметные количества инертных газов, накапливающихся в них в результате ядерного взаимодействия космических частиц с веществом метеоритов. В процессе этого образуется широкий спектр масс с атомными весами, меньшими исходного вещества и возникающими или в результате ядерного испарения, T , He^3 и He^4 , или как остаточные ядра в результате глубокого отщепления, неон и аргон.

Нами исследовались содержание и изотопный состав инертных газов, выделенных из трех индивидуальных метеоритов сихотэ-алиньского метеорита, выпавшего 12 февраля 1947 г. большим числом индивидуальных метеоритов и их осколков.

На основе изучения содержания и распределения изотопов гелия, неона и аргона в различных кусках мы предполагали определить их местоположение в исходном метеорите до попадания его в атмосферу, оценить его первоначальную массу и возраст. В.Г.Фесенков [2] установил, что его первоначальная масса составляла около 1000 т, а скорость, с которой он влетел в атмосферу, была около 14,5 км/сек. Потеряв значительную часть своей массы, он раздробился на высоте нескольких километров над поверхностью земли на большое число осколков. Было собрано 37 т индивидуальных метеоритов и осколков. Вес всего выпавшего на землю метеоритного вещества оценивается в 70–100 т.

Нами были выбраны три индивидуальных метеорита, одинаковых по внешнему рельефу. Со всех сторон они были покрыты тонкой корой плавления с ярко выраженным регмаглиптовым рельефом. Одна сравнительно уплощенная поверхность каждого метеорита была покрыта регмаглиптами крупных размеров (5–10 см в поперечнике). Остальные стороны образовывали выпуклую фигуру, имеющую форму весьма пологого конуса и имели регмаглиптовый рельеф размерами, не превышающими 2–4 см в поперечнике. Согласно представлениям Е.Л.Кринова, размер регмаглиптов метеорита является функцией его величины [3]. Было высказано предположение, что сторона с крупными регмаглиптами была поверхностью единого метеорита в момент его раздробления в атмосфере, а мелкие

регмаглипты являются вторичными и образовались после его раздробления при последующем ориентированном полете осколков метеорита через нижние слои атмосферы, когда крупные регмаглипты не смогли выгореть. Выбранные индивидуальные метеориты имели следующие максимальные размеры и вес:

	размер в <i>см</i>	вес в <i>кг</i>
№2093—	57 x 54 x 29	264,1
№2018—	51 x 46 x 23	186,2
№2108—	48 x 37 x 30	164,1



Рис. 1. Индивидуальный метеорит № 2093

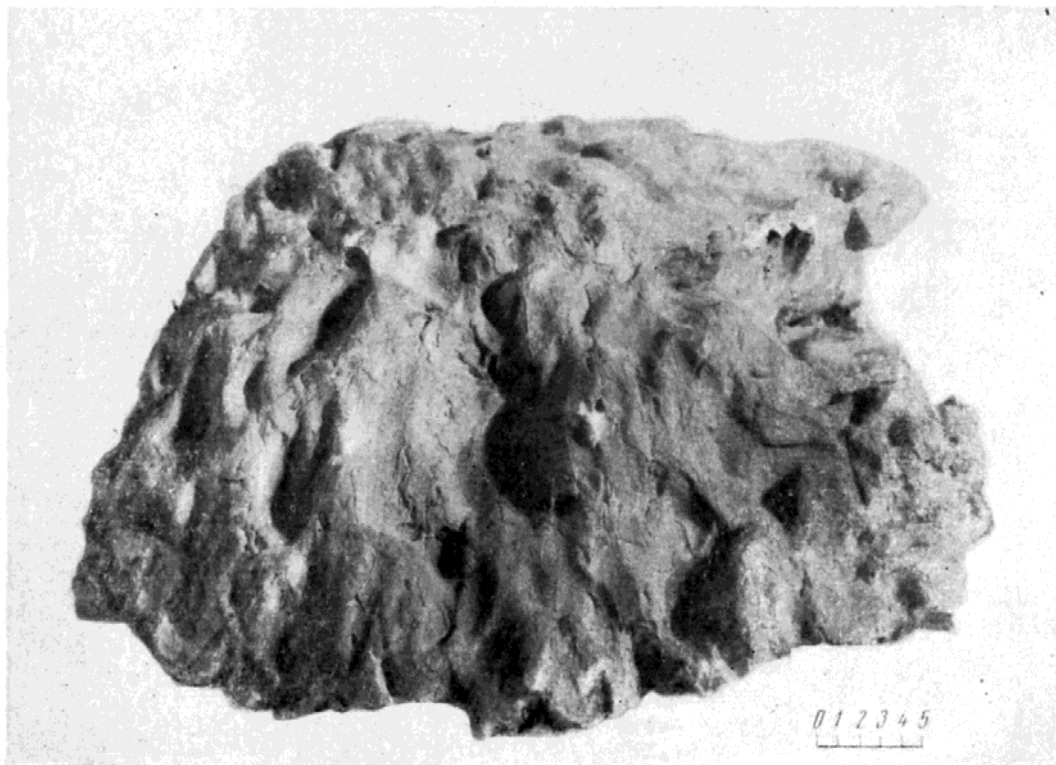


Рис. 2. Индивидуальный метеорит № 2018

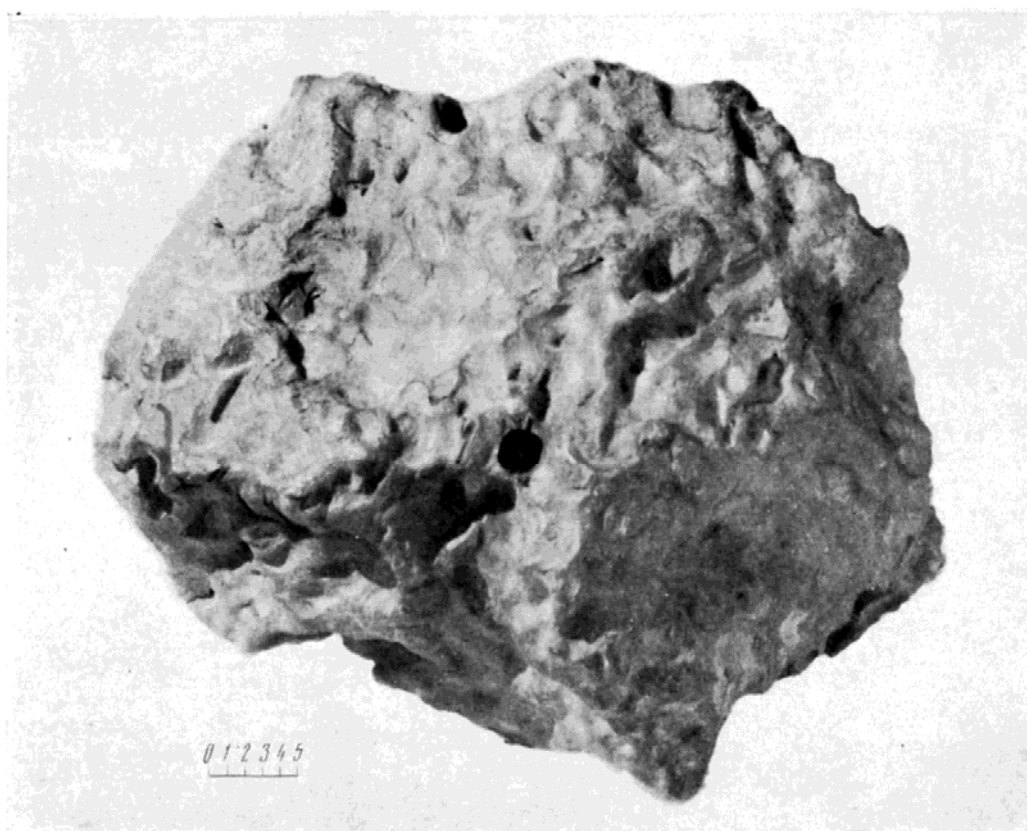


Рис. 3. Индивидуальный метеорит № 2108

ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Отбор проб для извлечения газов проводился в форме стружки, взятой из глубин 0–2 и 2–4 см с противоположных сторон каждого метеорита. Пробы брались также из точек на поверхности, отстоящих одна от другой на расстоянии 20–30 см. Извлечение газов из навески пробы проводилось нагреванием в высокочастотной индукционной печи, а их очистка — химическим поглощением примесных газов в кальциевой и медно-окисной печах. Проба, загруженная в боковой рукав вакуумной печи, порциями засыпалась в предварительно обезгаженный графитовый тигель, в котором она нагревалась выше температуры плавления железа и выдерживалась при этом в течение одного часа после засыпки последней порции. Выделяющиеся газы через ртутный клапан направлялись в печь с CuO , а затем в печь с металлическим кальцием. После очистки аргон и остатки других газов поглощались активированным углем, охлажденным до температуры -185° , а гелий и неон в совместном присутствии замерялись компрессионным манометром. Чистота газа проверялась спектро스코пом. После замера эти газы через ртутный замораживаемый затвор [4] переводились в ампулу и отпаивались для передачи на масс-спектрометр. Оставшийся аргон очищался повторным пропусканием через кальциевую печь и затем отпаивался. Ошибки объемного измерения газа составляли для больших количеств от 3 до 5%, а в случае малых (образец 2108) до 20–25%.

Изотопный анализ выделенных газов и количественные замеры аргона и неона проводились на масс-спектрометре МС-2, настроенном на высокую чувствительность. Операции с такими малыми количествами газов затруднены ввиду фоновых линий, присутствующих в этих областях масс, а также возможных примесей углеводородов в образцах газов, особенно в случае аргона.

Система для напуска газа в масс-спектрометр была изготовлена в виде цельного блока из нержавеющей стали, в котором крепились металлические запорные вентили. Напуск газа осуществлялся плавной регулировкой игольчатого вентиля. Соединения напускной системы с насосами, ловушками и масс-спектрометром были осуществлены при помощи стеклянных трубок через коваровые переходы. В системе отсутствовали краны и шлифы с вакуумной смазкой и ртутные затворы. Она длительное время могла прогреваться до $400\text{--}450^\circ$ и сравнительно легко обезгаживаться. С целью выявления и устранения примесей углеводородов в образцах аргона, в напускной системе была установлена печь с бариевым поглотителем и ловушка, охлаждаемая жидким азотом. Образцы газа окончательно

очищались от примесных газов и углеводородов в напускной системе, непосредственно перед впуском их в масс-спектрометр для анализа.

Для устранения влияния углеводородного фона, особенно устойчивого в области масс 36 и 38, вакуумная камера масс-спектрометра и напускная система длительное время прогревались и откачивались. Обезгаживание проводилось до тех пор, пока собственный фон масс-спектрометра практически переставал изменяться во времени в течение 1 часа и более, а подключение области напускной системы не оказывало влияния на величину фона. Остаточный фон масс-спектрометра на этих массах соответствовал 10^{-8} см³ газа. Объемы измеряемых образцов составляли 10^{-5} – 10^{-6} см³. Фон в области масс He³ и He⁴ всегда отсутствовал.

Возможный фон от водородных линий HD⁺ и HНН⁺ контролировался измерением интенсивности ионного тока от Н₂⁺, которая была значительно ниже той предельной величины, начиная с которой появляется фоновая линия ННН⁺.

В области масс неона 21 и 22 фон отсутствовал. В области массы 20 присутствовал постоянный во времени фон по величине меньше 10^{-8} см³ газа.

Количественные измерения аргона проводились методом изотопного разбавления на масс-спектрометре. В качестве эталона был применен воздушный аргон и аргон, обогащенный в 30 раз по изотопу Ar³⁶. Количество неона измерялось методом сравнения интенсивностей пробы и эталонного газа, для чего сначала измерялась интенсивность Ne²⁰ пробы, а затем эталона.

Ошибки измерения изотопных отношений больших количеств гелия составляли ±1%, а малых количеств гелия и аргона ±2–3%; в случае неона они составляли около 7%. Содержание аргона определено с ошибками ±5%, а неона ±12%.

В целях исключения ошибок масс-спектральных измерений дискриминационного характера в ходе измерений проводились контрольные замеры образцов He, Ne и Ar известного изотопного состава.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ОБСУЖДЕНИЯ

В таблице представлены результаты измерения содержания и изотопного состава гелия, неона и аргона, выделенных из трех индивидуальных метеоритов. Явно обнаруживается тенденция пропорционального убывания содержания всех газов при переходе от одного метеорита к другому. Наиболее богатый гелием метеорит 2093 содержит и максимальные количества аргона и неона. Так же монотонно происходит изменение изотопного отношения He³/He⁴. Эти результаты подтверждают предположение, что

одновременно с гелием в результате ядерных реакций под действием космических лучей имеет место пропорциональное накопление аргона и неона.

Образцы аргона всегда содержали некоторое количество примеси воздушного аргона, неизбежно попадающего в аппарат в процессе выделения и очистки аргона из пробы. Коррекция на примесь воздушного аргона проводилась в предположении, что Ar^{40} в результате ядерных реакций образуется в тех же количествах, что и Ar^{36} , а доля радиогенного Ar^{40} , накапливающегося за счет превращения K^{40} в Ar^{40} , незначительна ввиду ничтожно малого содержания калия в железных метеоритах, меньше 10^{-4} z/z Fe. Практически можно принять весь Ar^{40} воздушного происхождения. Исправленное на примесь воздушного аргона отношение $\text{Ar}^{38}/\text{Ar}^{36}$ составило 1,60 для образца 2093. Это отношение уменьшалось для других метеоритов одновременно с уменьшением содержания в них аргона.

Отношение He/Ar (или $\text{He}^3/\text{Ar}^{38}$) не оставалось постоянным, а монотонно возрастало в зависимости от уменьшения общего содержания гелия и аргона как в пределах одного метеорита, так и при переходе от одного метеорита к другому. Более быстрое убывание содержания аргона по сравнению с гелием можно объяснить уменьшением энергии возбуждения ядер железа по мере проникновения космических частиц в глубь метеорита.

Содержание неона было измерено только для метеорита 2093, в двух других оно было мало и его не удалось измерить.

Отношение распространенностей изотопов неона оказалось близким к единице, т. е. они образуются примерно в равных количествах. Отношений $\text{Ar}^{38}/\text{Ne}^{20}$ составляет около 5:1, что подтверждает результаты, полученные в работе [5], и близко к значению 4:1, полученному из отношений выходов образования остаточных ядер в результате реакций глубокого отщепления [1, 7].

Полученные результаты позволяют сделать ряд выводов:

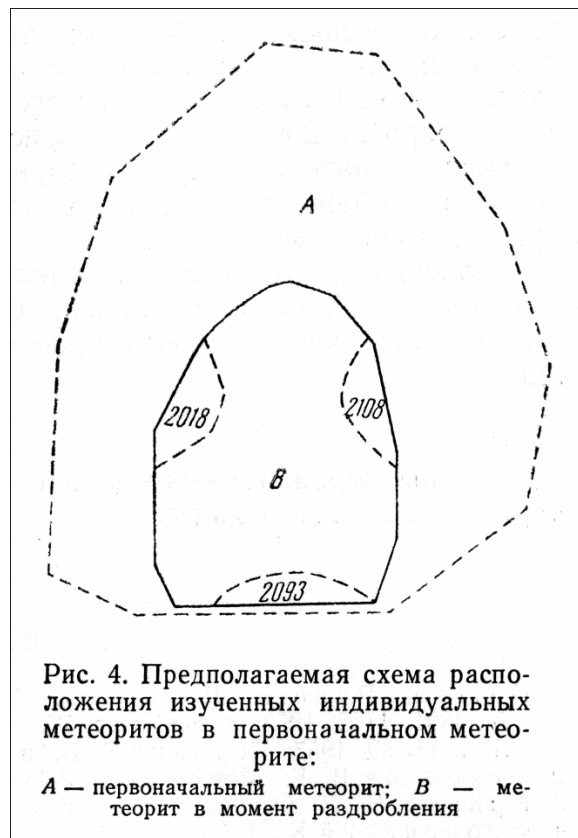
1. Подтверждается представление о связи между размерами метеорита и характером регмаглиптов на его поверхности. У двух из исследованных метеоритов №2093 и 2018 совершенно отчетливо выявлено уменьшение содержания гелия и аргона, а также изменение изотопного отношения He^3/He^4 по мере продвижения от поверхности с крупными регмаглиптами к противоположной стороне. Можно полагать, что поверхности с крупными регмаглиптами были поверхностями большого метеорита в момент его раздробления в атмосфере. Хотя для третьего метеорита 2108 подобные изменения не обнаруживаются, однако по характеру регмаглиптов можно полагать, что одна его поверхность также составляла часть поверхности большого метеорита в момент его дробления.

2. Проведенные аналогично работе [6] вычисления изменения содержания гелия в большом метеорите по радиусу от его поверхности к центру показывают, что максимальное

содержание гелия будет на глубине 8–20 см от первоначальной поверхности, начиная с которой происходит быстрое его уменьшение. Отношение содержания гелия на этой глубине к содержанию на поверхности составляет 1, 2. Максимальная глубина, на которой еще возможно обнаружить современными методами измеримые количества гелия (в предположении, что метеорит облучался космическими лучами в течение $5 \cdot 10^9$), составляет около 150 см.

Эти результаты позволили нам рассчитать положение трех метеоритов на графике изменения содержания гелия с глубиной и, следовательно, определить их положение в исходном метеорите по отношению к первоначальной поверхности. В образце 2093 отношение в содержании гелия на противоположных сторонах на расстоянии 20 см составляет 0,7, в то время как на поверхности с крупными регмаглиптами не обнаружено изменения в его содержании в пределах 4 см, хотя изотопное отношение He^3/He^4 резко изменяется от значения 0,284 для пробы с глубины 0–2 см до значения 0,246 для пробы с глубины 2–4 см. Можно полагать, что метеорит 2093 находился на глубине 8–15 см от первоначальной поверхности исходного метеорита, т. е. на глубине, где имеет место максимальное накопление гелия. Эти выводы подтверждаются также общим содержанием аргона и неона и особенно их изотопными отношениями, которые близки к значениям, полученным другими авторами для малых метеоритов.

Другие два метеорита содержат меньшее количество гелия, содержание и изотопный состав которого или слабо изменяются по глубине (как в случае 2018), или совсем не изменяются (как в случае 2108). Глубина расположения от поверхности метеорита 2018 ориентировочно может быть определена в 60–90 см, а метеорита 2108 — около 100–150 см (рис. 4).



Отсюда следует, что оплавление метеорита и сдувание с него вещества происходили неравномерно со всех сторон, т. е. он имел ориентированный по своему положению полет. Предполагая, что максимальный слой, обгоревший с тыловой части, составил 10 см, максимальный с апекса — 100–150 см (по положению куска 2108), а общий вес выпавшего на землю метеорита около 100 т, можно оценить минимальное количество обгоревшего вещества (около 300–400 т) и общий вес первоначального метеорита (около 400–500 т). Эта грубая оценка, по-видимому, не сильно отличается от действительного веса метеорита, влетевшего в атмосферу земли.

3. Произведем оценку времени, в течение которого метеорит подвергался облучению космическими лучами с момента его последнего отвердевания. Оценка произведена по данным сечения образования трития в железе под действием протонов с энергией 2,05 Бэв [7]. Предполагая интенсивность космического излучения сохранявшейся постоянной во времени и равной величине, измеренной на полюсе, определим скорость накопления He^3 за счет образования трития, распадающегося с периодом 12 лет в He^3 , и собственно He^3 .

Принимая длину свободного пробега взаимодействия равной 108 г/см^2 , коэффициент множественности образования трития — 0,07 и поток первичной радиации $0,34 \text{ нуклона/см}^2 \text{ сек стерадиан}$, получим скорость образования трития на поверхности большого метеорита:

$$\Pi \times 0,34 (0,07/108) = 6,9 \text{ тритонов/г сек.}$$

Принимая отношения $\text{He}^3/\text{T} = 0,7$ и коэффициент 1,2 для глубины максимального накопления гелия, получим скорость накопления He^3 , равную $1,6 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$ за 10^9 лет. Измеренное количество He^3 на поверхности метеорита 2093 составляет $2,20 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$, что дает значение возраста $1,4 \cdot 10^9$ лет.

Можно оценить возраст метеорита по количеству накопившегося He^4 за счет распада урана и тория. Содержание урана в метеорите составляет $1,9 \cdot 10^{-8} \text{ г/г}$. Содержание тория в нем неизвестно; исходя из среднего отношения $\text{Th}/\text{U} = 3,8$, можно принять его содержание $7,3 \cdot 10^{-8} \text{ г/г}$. Количество радиогенного He^4 может быть определено вычитанием из общей суммы измеренного гелия количества космогонического гелия, подсчитанного для двух пределов отношения He^3/He^4 : 0,40 и 0,25 [1]. Полученное этим расчетом количество радиогенного гелия не было постоянным, а изменялось в широких пределах для трех изученных метеоритов: в случае минимального содержания гелия для глубинного образца 2108 получен возраст $50 \cdot 10^6$ лет, в случае максимального содержания для поверхностного образца 2093 получен возраст $700 \cdot 10^6$ лет.

Низкое значение возраста, определяемого этим методом, отчасти может быть объяснено, вероятно, завышенными величинами содержания урана и тория в метеорите.

Вышеуказанные методы определения возраста не могут дать истинного значения возраста, т. е. времени формирования метеоритного вещества, а лишь указывают на время, прошедшее с момента его последнего отвердевания.

Авторы выражают благодарность Е.Л.Кринову за предоставление материала и ценные советы.

Поступила в редакцию
15.VIII.1957

ЛИТЕРАТУРА

1. Dalton, Paneth, Reasbeck, Thomson and Mayne. Nature 172, №4391, 1168, 1953; Gentner W. and Zahringer J. Geoch. et. Cosmoch. Acta 11, 60, 1957; Герлинг Э.К. и Левский Л.К. Геохимия, №7, 59, 1956.
2. Фесенков В.Г. Метеоритика, 1949–1953.
3. Кринов Е.Л. Основы метеоритики, 1955. Chem. d. Erde 18, №1/2, 1956.
4. Флоренский К.П. Приборы и техника эксперимента, №1, 114, 1957.
5. Reasbeck P. and Mayne K.I. Nature 176, №4485, 733, 1955.
6. Martin G.R. Geoch. et Cosmoch. Acta 3, №6, 288, 1953.
7. Currie L.A., Libby W.F., Wolfgang R.L. Phys. Rev. 101, №5, 1557, 1956.

CONTENT OF INERT GASES IN THE SIKHOTE-ALIN METEORITE

A.P.VINOGRADOV, I.K.ZADOROZHNY and K.P.FLORENSKI

*V.I.Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Academy of Sciences, USSR,
Moscow*

The content and the isotopic composition of He, A, Ne in the iron meteorite Sikhote-Alin has been determined in various pieces. According to the depth of meteoritic matter the ratios of the amounts of the He and A isotopes decrease following different laws. The argon concentration is more rapidly decreasing than the helium concentration. The cause of this phenomenon is considered.

On the basis of the data obtained the attempt is made to determine the size of the meteorite and its age.

Таблица

Содержание инертных газов

№ индивиду- дуальных метеори- тов	Глубина взятия пробы в см	Содержание He в 10^{-6} см ³ /г		$\frac{\text{He}^3}{\text{He}^4}$	Содержание Ar в 10^{-8} см ³ /г		Измеренные изотопные отношения Ar ³⁶ :Ar ³⁸ :Ar ⁴⁰	Исправ- ленные на Ar ⁴⁰ =1 Ar ³⁶ :Ar ³⁸	Содержание Ne в 10^{-8} см ³ /г		Изотопные отношения Ne ²⁰ :Ne ²¹ :Ne ²²	$\frac{\text{He}}{\text{Ar}}$	$\frac{\text{He}^3}{\text{Ar}^{38}}$	$\frac{\text{He}}{\text{Ne}}$	$\frac{\text{He}^3}{\text{Ne}^{20}}$	$\frac{\text{Ar}^{38}}{\text{Ne}^{20}}$
		He	He ³		Ar	Ar ³⁸			Ne	Ne ²⁰						
2093	2	9,80	2,20	0,284	—	—			6,3	2,2	1:0,89:0,98	56	18	160	91	5,0
	4	10,10	2,0	0,246	18,1	11,1	1:1,5:14	1:1,58	3,15	1,1	1:0,89:0,92	68	21	230	127	6,0
	20	7,30	1,40	0,236	10,7	6,6	1:1,5:23	1:1,60	3,5	1,2	1:0,85:0,98	79	25	206	117	5,1
	22	7,20	1,40	0,235	9,1	5,6	1:1,4:56	1:1,60	—	—		108	33			
2018	2	2,80	0,50	0,229	2,6	1,5	1:1,1:91	1:1,54	—	—						
	22	2,40	0,45	0,227	—	—						121	36			
	24	2,30	0,40	0,222	1,9	1,1	1:1,2:74	1:1,53	—	—		—	—			
2108	2	0,80	0,15	0,202	—	—						100	28			
	4	0,60	0,10	0,205	0,60	0,36	1:0,8:156	1:1,46	—	—		—	—			
	18	1,10	0,20	0,208	—	—						112	40			
	20	0,90	0,20	0,210	0,80	0,50	1:1,0:89	1:1,46	—	—						