

地球化学专家讲稿

第一册

北京地质勘探学院

1956

1. Гольдшмидт В.М. - Кристаллохимия, 1937.
2. Гольдшмидт В.М. - Основные идеи геохимии, вып. 1, Госхимиздат, 1933.
3. Рассель О. - Кристаллохимия, 1935.
4. Эванс Р. - Введение в кристаллохимию, 1936.
5. Ферсман А.Е. - Избранные труды т. III, 1955, стр. 90-145.
6. Ферсман А.Е. - Геоэнергетические проблемы. Очерк 1. Энергия иона. " Природа " № 9, 1935.
7. Ферсман А.Е. - " Геохимия " т. III, 1937, стр. 85-184.
8. Ормонт Б.Ф. - Структуры неорганических веществ. 1950.
9. Капустинский А.Ф. - Физическая химия металлургических процессов. Изв. АН СССР, 1933.
10. Брэгг У.Л. - Кристаллическое состояние, т. 1 (общий обзор), 1938.
11. Брэгг У.Л. - Структура силикатов. Сб. "Основные идеи геохимии", В. III, 1937 г.
12. Ботвинкин О.К. - Введение в физическую химию силикатов, 1938.
13. Августиник А.И. - Физическая химия силикатов, 1947.
14. Белов Н.В. - Структура ионных кристаллов и металлических фаз, 1947.
- 15.

16. Вернадский В.И. и Курбатов С.М. - Земные силикаты, алюмосиликаты и их аналоги. 1937.

17. Вернадский В.И. - Избранные сочинения, т. 1, 1954, стр. 519-527.

18. Штольд Э. - Структура силикатов. Сборник "Основные идеи геохимии", вып. III, 1937.

19. Тейлор В. - Природа алюмосиликатных остовных ("вязаных") структур и их свойства. Сборник "Основные идеи геохимии", вып. III, 1937.

20. Белов Н.В. и Г.Б. Бокий - Современное состояние кристаллохимии и ее ближайшие задачи. Первое совещание по кристаллохимии (рефераты докладов). Изд. АН СССР, стр. 7-38.

21. Белов Н.В. - Очерки по структурной минералогии (15.. Механизм поляризационных эффектов в кристаллической решетке и его роль в некоторых характерных минералогических структурах). Минералогический сборник Львовского геологического общества, № 7, 1953.

22. Соболев В. - Введение в минералогию силикатов, 1949.

23. Соболев В. - Кристаллохимия двойных солей и их роль в петрологии и минералогии, Изв. АН СССР, серия геологическая, № 5, 1944.

24. Соболев В. - Энергия кристаллической решетки и закон распределения ионов в кристаллах. Минералогический сборник Львовского геологического общества, №1, 1947.

25. Соболев В. - Значение координационного числа алюминия в силикатах. Мин сборник Львовского геологического общества, № 2, 1948.

26. Грушецкий Н.В. - К вопросу о связи между химическим составом и кристаллическим состоянием. Ученые записки Ленинградского госуниверситета, серия геологических наук, в. 4, № 178, 1954 (стр. 196-230).

27. Сыркин Т.К. и Ляткина М.Е. - Химическая связь и строение молекул. Госхимиздат, 1946.

28. Наулинг Л. - Природа химической связи. Госхимтехиздат, 1947.

29. Уэлло А.Ф. - Строение неорганических веществ, 1948

30. Яцимирский К.В. - Ионные радиусы и потенциалы ионизации. Журнал общей химии, т. 23, в. 2, 1953.

31. Яцимирский К.В. - Термохимия комплексных соединений. Изд. АН СССР 1951.

32. Соколов Н.Д. - О физических основах теории химической связи. "Успехи химии", т. 18, В.6. 1949.

33. Говаренных А.С. - О некоторых основных вопросах кристаллохимии и их понимании в минералогии. Записки Всесоюзного Минералогического общества, вторая серия, часть 34, вып. 4, 1955.

34. Некрасов Б.В. - Электросродство химических элементов. Журнал общей химии, т. 16, в. 11, 1946.

35. Сауков А.А. - Госхимия, 1951, стр. 127-174.

36. Сауков А.А. - Энергия кристаллической решетки и

роль в геохимии. Изв. АН. СССР, серия геологическая,
1937, в. 3.

37. Лебедев В.И. - О правильном и неправильном при-
менении представлений об энергии кристаллической решетки
в геохимии. Вестник Ленинградского университета, 1952,
№ 10.

38. Лебедев В.И. - О состоянии кислорода, химической
связи в силикатах и некоторых минералогических вопросах в
связи с этим. Вестник Ленинградского университета, № 3,
1948.

39. Лебедев В.И. - Минералогическое правило объемов и
энергия химической связи. Доклады АН СССР, 1948, том 53,
№ 4.

40. Лебедев В.И. - Несколько примеров энергетического
анализа процессов образования силикатов по методу проф. С.
Шукарева. Записки Всесоюзного Минералогического общества,
1952, вторая серия, часть 81, № 2.

41. Лебедев В.И. - К вопросу о путях развития советской
минералогии и проблеме энергетики силикатов. Вестник Ле-
нинградского университета, № 11, 1948.

42. Лебедев В.И. - Несколько замечаний по поводу ра-
боты Н.В. Грушвицкого. Ученые записки Ленинградского гос-
университета, серия геологических наук, т. 4, № 173, 1951.

43. Шукарев С.А. - "О термической устойчивости смеси
марганца и железа". Ученые записки Ленинградского госуни-
верситета, серия химическая, № 73, т. 7, 1953.

地球化学讲稿

第一讲

緒論

主要問題：

- (1). 地球化学的定义、它的研究对象和任务；
- (2). 地球化学的方向以及对它们的分析和批判；
- (3). 地球化学的思想史，地球化学的奠基人：罗蒙諾索夫、门德雷耶夫、克拉克、维尔納德茨基、艾尔德施密特和費尔斯曼等人；
- (4). 地球化学的理论和实际意义；
- (5). 地球化学与其他科学（矿物学、岩石学、矿床学、结晶学、地質学、化学、物理学等）的相互关系；
- (6). 地球化学的研究方法（Методы и Методика）；
- (7). 苏联和国外的地球化学的成就，地球化学今后发展的道路；
- (8). 地球化学的主要章节；
- (9). 地球化学的主要参考文献

X

X

X

I. 在地质科学的领域中，即在研究地壳的成分和性质以及地壳中所发生的一切作用的科学中，地球化学是一门最新的科学。地球化学作为一门独立的科学始于十九世纪末和廿世纪初。然而，由于最近一段时期的地球化学的成就，这门科学已与那些帮助人们打开认识宇宙之鑰的最重要科学並駕齊驅。

地球化学和所有其他地质科学一样，也是从采矿业的实践中成长起来，并且由于地质学、矿物学、化学和物理学的发展而得到最终的定形，因为它已成为一门精确的地质科学，向我们揭示在地壳中所发生的一系列新规律的地質現象。

在地球化学发展的过程中，許多研究者企图把地球化学与其

他像化学、矿物学和矿床学等科学结合在一起；这是因为在发展的各阶段中曾陆续不断地发现了在地球化学方面的这种或那种特性，结果充实了地球化学的内容，加强了地球化学和别的一些科学的联系，因而产生了在方法上不正确的概念，认为地球化学实质上纯粹是化学或矿物学。

关于地球化学和其他科学的关系，我们将在下面谈到；不过这里要指出一下，地球化学按其本质讲乃是一门具有自己特殊任务和方法的地质科学。这并不是有关地球中的化学元素知识的简单总和，而是物质运动规律的完全单独的质的表现。

在地球化学形成为一门独立的科学过程，人们曾对其提出了各种不同的定义，这些定义在某种程度上反映了地球化学的发展进程，并且也曾确定过它的任务和内容。最完全而又最精确的地球化学的定义是由地球化学奠基人和创始人维尔纳·德茨基院士提出的。1922年他在“地球化学概论”中写道：“地球化学是要科学地研究化学元素，也就是说研究地壳中的原子甚至在可能范围内研究整个地球的原子。它研究这些原子的历史以及它们在空间和时间上的分布和运动，其次也研究它们在地球上的成因关系”。接着他又写道：“地球化学与矿物学有显著的区别，后者只是研究这些原子^的化合物——分子和晶体——^在地球历史中的全一空间和时间上的历史。在这个极有限的地球范围内，地球化学揭露着直到目前我们在无穷天体空间中所预感到它们存在的那些现象和规律。现在我们明显也知道，化学元素在这些空间的凝聚体是云、行星、原子云（~~即所谓星云~~）和宇宙塵中的分布，不是杂乱无章的，而是取决于它们的原子结构”（维尔纳·德茨基论文集一卷，14页）。德国著名的地球化学家和矿物学家艾捷尔（Zittel）教授于1930年对地球化学基本问题的表述，也是与上述定义很相近，他说：“我们认为地球化学基本问题是根据元素分布的特殊规律，精确地并在量的方面确定各种元素在地球中的存在情况”。

戈尔德施密特(1927)所提出的地球化学的任务也大致与此相同：“地球化学的任务一方面确定地球化学成分的量，另一方面是探寻各元素分布的规律”。所有这些定义的主要意思是着重说明：必须要研究整个地球，而不是仅仅研究地壳而已。

卓越的苏联地球化学家和矿物学家费尔斯曼院士(1933)综合了地球化学全部发展历史过程中取得的成就，并对作为一门科学的地球化学下了如下的定义：“地球化学旨在研究地壳（以及可以精确研究的宇宙部分）中的元素——原子；它研究：（1）地壳中化学元素的量的分布、元素的比例和局部富集；（2）各元素在地壳各部分的组合以及它们在自然界的各种化学作用中的空间和时间上的分布；（3）元素在热力学条件变化下的迁移及规律；（4）元素在整个地壳中和与其他元素组合时以及特别是在自然界结晶构造中的行为”。或者简言之，“地球化学研究地壳中元素——原子——的历史以及其在自然界各种不同的热力学与物理化学条件下的行为”（费尔斯曼选文集 三卷 21页，1955）。

然而，即使像这样的完整而又严格的科学定义还是远非为所有研究者所赞同。

II. 关于地球化学的定义、任务和内容，在过去至少有两个不同的派别进行着搏斗。第一个派别可称为经验统计派，是由克拉克（美国化学家）提出的。他于1908年发表了“

”一书，在该书中他根据岩石、矿物、水等的化学成分的大量数字，计算了地壳以及地壳中不同形成物之平均化学成分。克拉克虽然搜集了这些资料并且做了适当的结论和综合，但他并没有提出任何地球化学的任务，首先没有提出地球化学的主要任务——研究地球中的原子的历史。而研究地球中的原子历史这一名称是在以后产生的，它并没有包含在克拉克思想之中。总之，克拉克认为，地质学中的一切化学现象，都属于地球化学范围内；简而言之，克拉克及其继承者把地球化学的全部内容归

结为解决元素分布的问题，这无疑是显得过于肤浅和片面。克拉夫的地球化学跟比绍夫 (Σамоб) 的物理地质学和化学地质学相当，但是它所遇到的却是另一种科学环境。

地球化学中的第二个主要派别可称为原子学派，这一学派与维尔纳德茨基院士及其学生和继承者费尔斯曼院士的名字是分不开的。其次，戈尔德施密特的地球化学思想也接近这一派的。维尔纳德茨基在其所著的“地球化学概论”中写道：地球化学乃是关于地球原子历史的科学的概念系产生在与矿物学概念（该概念于1890—1911年间为莫斯科大学所引用的）有紧密联系的新的原基学说以及新的化学和物理学理论的基础上；

维尔纳德茨基、费尔斯曼和戈尔德施密特明确而又肯定地提出了地球化学的具体任务，着重地注意研究自然界中取决于原子和离子结构及性质的化学元素的行为，并且提出其最终目的是要为每一种化学元素绘出一幅它在空间和时间上的分布和运动的图景。

如果现在我们浏览一下所有有关地球化学的著作以及注视一下近代世界地球化学的思想，那么易于确信，第二个派别——维尔纳德茨基、费尔斯曼和戈尔德施密特的派别——取得了胜利。

在苏联学者所拟定的地球化学的定义中强调指出，地球化学首先是作为一门地质学的科学，其所研究的问题的主要范围乃是地壳，其次才是地球和宇宙。

综合上述，可以提出下列的近代地球化学的定义。它的研究对象、内容和任务：地球化学是地质学领域中的一部分科学，它首先研究地壳的整个化学生命，然后才着手研究地球和宇宙；地球化学确定化学元素在整个地壳和自然界中的分布规律，确定它们的集中和分散的原因和特性以及引起这些原因和特性的那些地质作用；地球化学也研究化学元素在地壳和地球中的迁移并说明门德雷夫周期表中各元素的历史。地球化学是探讨与化合物中

结构、原子所处的具体地质和热力学环境有关的现象。地球化学的研究对象是化学元素的原子，而且它与化学及物理学不同，在自然界实验室首先在地壳中研究原子的。由此可见，地球化学所以能够产生仅仅是获得了有关化学元素原子及其主要性质的详细材料以及建立了有关地球构造的主要原理以后。至于地球构造，在十九世纪末叶普斯（Э. Шюсе）曾经作过研究。

Ⅲ. 近代地球化学产生于廿世纪初。但是，广义地说，关于探讨化学元素的概念以及论述矿物的化学成分和找寻金属矿床的标誌的地球化学思想是已存在了三—四百年。

阿格里科拉（Г. Агрикола）是当时最早的一位学者，他的名字与近代地球化学的前期历史紧密地联系着，他遗留下许多有关当时金属矿床知识综合的著作。

罗勃列特·博依尔（Роберт Бойль 1627—1691）是有关化学元素学说的奠基人，也是近代化学的创始人，他第一次精确地区分地球中的化学元素，而且还对地球的产物作了精确的化学分析。

罗蒙诺索夫（1711—1765）是一位当时有天才的人物，他对于化学、物理学和地质学的各种不同问题都有着渊博的见解。他的思想远远超越他所生活的那个时代；然而唯一遗憾的是：他的著作并未得到应有的传播。罗蒙诺索夫所阐明的许多观念（例如，像关于地压、矿体的形成和石炭等观念）从地球化学方面观，包含着许多颇价值的东西。在其观念中反映出化学和矿物学是有着彼此不可分割的联系。他毫不间断地钻研着自然体的化学，而不但是研究其个别现象，而是从总的方面，并结合着地球的历史来研究（维尔纳德茨基文集 1卷 16页）。

拉瓦兹耶（А. Л. Лавуазье 1743—1794）是近代化学奠基人之一，他研究了自然界中的矿物，并表述了一系列地球化学的思想，这些思想在地球化学的发展中起了一定的作用。拉瓦兹

耶的地球化学思想特别贯穿于他所写的《地球化学元素》(ЭЛЕМЕНТАРНАЯ)以及他的《史》等著、作的思想给予整个新化学的发展以巨大的影响，因而大大促使地球化学问题渗透到新化学中去。也从那时起，化学便越来越多地应用于矿山业务和矿物学中。

加尤依 (Р. Гаюи, 1743-1822) 是当时最权威的结晶学家，他创立了晶体结构的学说，确定了有理指数定理，并引用了一个很重要的地球化学概念“基本晶体” (晶体化学中的“基本晶胞”的雏形)。加尤依的功绩主要在于他把化学推用到矿物学中去。

其次，在列伊尔 (Рейль, 1759-1813) 的著作和古姆博尔德特 (А. Гумбольдт, 1769-1859) 的巨著中可以找到好多有关生物地球化学的思想；列伊尔是普鲁士人，是当时一位著名的医生，而古姆博尔德特是英国的矿物学家和地质学家。

到了十九世纪上半期开始曾经迅速发展的地球化学思想稍为显得停滞不前，其原因在于学者们把主要的注意力放在矿物的物理性质的研究以及矿物的鉴定 (描述矿物学) 上；而对于矿物和金属矿床的成因问题当时却研究的很差。

地球化学发展和形成的全部历史过程证明，地球化学是渊源于矿物学的，后者是一门最光的科学，结晶学和岩石学也是从它之中分出来的。

矿物学在其本身的历史发展过程中是循着两个方向进行：(1) 研究矿物的物理和几何性质；(2) 研究矿物的化学成分和成因。当矿物学蓬勃发展的时期 (十八世纪末和十九世纪初)，第一种方向显然被提到首要地位。在这个时候发现了固态物体结构的基本规律 (罗曼、德、里尔、加尤依、稍后的格谢尔和勃拉维等人的工作)。所以测角仪和显微镜几乎是当时唯一的研究工具。

与此同时，对于矿物的化学成分即对于决定矿物外形实质的事实的注意，也像一般地注意到地壳中所发生的那些化学作用一

样並不絲毫削弱。在這方面正像我們所知道的一樣，早在十八世紀末葉，化學家、地質學家以及一般性的哲學家——自然科學家（羅蒙諾索夫、拉瓦錫耶、加尤依等）——就已對礦物的化學特征加以注意了。因此，地殼的化學作用的問題就提到議事日程上來了，礦山工作者和礦產研究者由於生活實踐，也陸續接觸到這一問題，這因為礦物的形成和積聚也與地球內部所進行的那些地球化學作用有關。

1798年俄國科學院院士謝維爾京（В.М.Севергин）——礦物學權威和羅蒙諾索夫的繼承者——在科學史中第一個表述了一個極重要的關於礦物的自然組合即礦物共生的地質概念，并用俄文「礦物的近隣」（Смежность минералов）表示這個概念。只有到了1849年，也就是說在此之後經過了50多年勒列依特高特（Брейтзагт）才第二個把這一概念引用在科學中并曾叫做「共生」。謝維爾京在研究礦物時，不僅注意其外部的物理性質，而且也注意到化學特征；他曾這樣寫道：「鑑定礦物的最好方法乃是根據其化學特征」。

貝爾采里烏斯（J. Berzelius, 1779-1848）是瑞典的傑出化學家，他發現了鉍、碲、釷和釷并第一個獲得鈾，他也是地球化學權威之一。他曾從自然界的地下深處獲取了一些材料并對其進行了定量的化學分析。貝爾采里烏斯所主張的「礦物學是地殼的化學」的思想實際上就是代表地球化學發展的萌芽。

米特契爾利赫（Митчеллих）於1819年所發現的異質同像現象大大推動了這一化學方向的发展，它有助於人們對礦物的化學成份的介紹。從這時起，礦物的化學研究已經處於一個牢固的基礎上，成為礦物學基本任務之一。同時人們對於直接研究地殼中化學作用的興趣也濃厚起來了。

精確地研究大量礦物的化學成份、進行多種岩石的化學分析，對於礦產的化學研究以及對於水和隕石的研究（赫拉德尼、戈克

尔德·布尔农), 所有这一切在十九世纪中叶以前曾为经验综合及地球化学的創立奠定了牢固的基础。

1838年时瑞士化学家申别英(X. Uehelien, 1793-1868)首先应用“地球化学”这一术语, 并表述了研究组成地壳的物质的化学性质对于研究地质学的必要性的意见, 他认为, 地球化学可以成为一个独立的科学部门。在1842年他写道: “数年以前我曾经公开地说过, 我们应该建立地球化学, 但是在说到这里以前, 首先要谈到现代的地质科学, 显然, 这门科学应该注意组成地球的物质之化学性质及其成因, 其次至少也应同样地注意这些形成物的相对年代以及埋藏在形成物中的古老的植物和动物化石的相对年代。因此有信心可以肯定地说, 地质学家不是永远地追随着现在某些研究者所继承的那个方向。他们要扩大地质科学的知識, 而又当化石不能为本身服务时, 应该找出新的辅助手段, 所以到这个时候, 他们无疑地会把矿物化学元素引用到地质学来。我认为, 实现这点的时期已非十分遥远的了”。

现在看来, 申别英这些话多少有些先知之明, 但他有一点弄错了, 即他的思想实现的时期在廿世纪才到临, 这是他死后几十年的事了。

在十九世纪中叶, 还进行了水成论者和火成论者之间的一场论战。最后, 便把这两种以大量的自然界观察事实为依据的学派的观点和原理综合起来。这些事实中也包含着各种不同的地球化学思想。

比绍夫教授(1792-1870)是德国人, 是一位水成论者, 于1847年出版了他著的“Lehrbuch der chemischen und physikalischen geologie”第一卷, 在此书中他搜集了大量的关于水溶液化学作用及物质在其中迁移的资料, 进行了科学性的整理, 这里, 他把地球生命中的化学作用的现象提到首位。

德国矿山矿物学家莫利·德·施蒙(Эмиле Бомон, 1798-

1874) 跟比绍夫不同,他是火成论者,他提出了化学元素之间的关系以及岩浆和火山作用中化学元素相互共生的规律性。鲍蒙在其卓越的研究报告“论火山挥发物的析出”(1846)中不仅异常深入地解释了熔融岩浆冷凝的过程,而且首次地纯从地球化学方面分析了各元素在自然界这一变化的作用中的遭遇。

这时(1849)出版了勃列依特高特(1791-1873)著的“*Paragenesis der Mineralien*”,他在书中综合了自己在富来堡矿业学堂中的多年的工作。勃列依特高特是从矿物形成条件方面着手研究矿物的,他也提出了矿物和元素的相互共生关系。根据实际资料,他证明水溶液可能与火山作用有关。

在比绍夫、鲍蒙和勃列依特高特的著作中已经具备了地球化学主要方面的牢固根基。故所以维尔纳德茨基这样写道:“如果当时,譬如说在1850年的时候,谁能把全部这些资料都一古脑儿掌握住,那么他已经能够在那时,即在十九世纪建立起地球化学。可是,后者的形成仅仅在二十世纪里”。

由此可见,在十九世纪中叶时期,由于解决地质学、矿物学、金属矿床学和化学的许多问题产生了并积累起丰富多彩的地球化学思想。但是即使在这个时候,地球化学还是不能形成为一门具有一定内容、任务、研究方法和研究对象的独立科学。因为这必须对原子元素和晶体有一个明确的认识,而这种认识在当时还没有。因此,为了准备必要的科学基础,尚需整整几十年的时间、巨大劳动和人们的思改。

1859年基尔赫戈夫(Kirchhoff)和朋普(Bunsen)发明了光谱分析法,随后,这种方法用来研究宇宙体的化学成分。光谱分析证实宇宙在化学成分上的一致性。

1868年门德雷耶夫确定了化学元素的周期律,这不仅为现代化学和物理学打下了基础,而且也为地球化学奠定了基础。这是一个伟大的发现。根据门氏周期律有可能解释原子结构;而且

这一周期律成为产生许多深湛的地球化学思想的源泉，其中最主要的是：化学元素在地球中不均匀分布的学说、元素在地球各部份的自然组合规律的学说以及元素迁移的规律等学说。

光谱分析的发明、门德雷耶夫对化学元素周期律的确定以及物理学中关于原子结构问题的成就，就是决定地球化学成为一门独立科学的三个因素，地球化学的任务就是研究理个为化学元素的继承的历史。

然而，欲使地球化学最终地形成一个独立的科学，还必须综合散佈于各种不同科学中的有关地球化学思想的全部现成材料，还必须获取大量的新事实及进行许多观察。

这一巨大的、需要人们顽强的意志和理性的工作便落在十九世纪末二十世纪初的四位伟大的科学代表者的身上，而近代地球化学的形成和建立是与他们的名字分不开来的。这就是：克拉克、维尔纳德茨基、戈尔德施密特和费尔斯曼。

克拉克 (1847-1931) 是美国地质学会的化学家，他在四十多年的时间里毫不间断地从事于地壳元素的量的统计工作。克拉克所统计的地壳化学成份的第一批数字是发表于1882年；此后，他根据新的资料又加以不断地改进和变更。在上所提到的“地球化学资料” (Data of geochemistry) 一书中，他曾对这些问题作了概括性的论述，该书对于科学思想起了巨大的影响，连续出了五版，第一版于1908年，最后一版于1924年。维尔纳德茨基写道：“克拉克所著的一书确实是地球化学的进一步综合今后工作的依据”。

克拉克的方法就是根据最有经验的化学分析家对地球表部岩石的化学分析，统计其平均数值。他所依据的纯粹是统计法的原理，岩石在某一化学分析时所标示的量就是该岩石在地壳中分佈的系数，因而当统计平均数值时，就不必要考虑岩石在地表分佈的量的差异。除此之外，克拉克还根据这一个原理，

就这些地壳总重量 5% 的沉淀若是结晶岩风化而形成的，如果说他的计算方法是正确的話，那末所得出所有的平均成份的总和与火成岩的一样。这种换算曾经做过，而且所有元素（铁除外）的结果都完全吻合。

克拉克 (K. H. Clark) 在北美以及謝傑尔·文尔特 (Седжвик) 在芬兰曾考虑到各类岩石的分佈面积，就地质学基础中各种岩石进行了检查，证明克拉克的数值基本上是正确的。

由于克拉克首先强调計称地壳和宇宙系的化学元素的平均含量，所以費尔斯曼在 1923 年把这一数值称为“克拉克值”。

现代地球化学发展的下一个阶段是与维尔纳德茨基 (1863—1945) 的名字分不开的，他不愧为俄国地球化学学派的奠基人和现代地球化学的创始人。维尔纳德茨基是一位傑出的矿物学家，他把矿物学看作是地壳中矿物的化学和历史。这样提出问题必须具有关于地壳中化学元素——原子——的分布和移动规律的知识以及对它们作过研究。弗拉基米尔·伊凡諾維奇 (维尔纳德茨基) 即解决了这一问题，因而他成为把地质学和矿物学与化学联系起来的新科学部门的创始人，即地球化学的创始人。从 1890 年开始维尔纳德茨基就已组织专门研究地球化学的工作，起初是在莫斯科，后来在列宁格勒；1913 年在列宁格勒在科学院中由他成立了专门的实验室，后者起初名叫拉季耶娃，后来更名为地球化学实验室。维尔纳德茨基曾在巴黎、布拉格和列宁格勒讲学，在其讲稿中包括地球化学的问题是广博众多的，而且对这些问题都作了系统的阐述。后来，所有这些问题维尔纳德茨基在自己的经典著作“地球化学概论”中进行了论述；此书第一版于 1924 年用法文刊印，不久以后才用俄文、德文和日文出版。

维尔纳德茨基对于现代地球化学的贡献是很难估計的。他第一个给予了地球化学以最完全而又最精确的定义，并提出了地球化学的具体任务；他研究了克拉克值，并按十进制将克拉克值分

式，其地也确定地壳中许多化学元素的绝对含量；他十分注意有关类质同象和化学元素迁移现象的许多问题，并对这些问题扩大科学研究；他最先提出许多化学元素（Na, Si, C 和放射性元素等）的地球化学史，研究过地壳中化学元素共生的问题和稀有元素（铷、钽、铈、钍、铀、钍、钍）分布的问题，为此，他第一个广泛地运用光谱分析。维尔纳德茨基全面地从单质石的研究，最后，他是地球化学新的分科——生物地球化学和放射性地球化学——创始人，他在最后数十年生命中在这些方面做了不少工作，因而它们目前几乎都已形成为独立的科学。

现代地球化学也和另一位研究者的名字紧密联系着，这就是阿尔德施密特（1888-1947），他创立了地球化学中的所谓晶体化学方向。最初他在奥斯陆（挪威）广泛地展开了科学活动，随后他到格丁根（德国），在这里他建立了地球化学的巨大科学中心。

阿尔德施密特的科学活动是多方面的。他曾研究过挪威古老岩石的接触变质作用，并在1911年发表了一部内容精闢的著作“克锐斯雅地区的接触变质作用”（*Kontaktmetamorphismen in Kristiania geiet*），在该著作中，他第一次出色地运用物理化学定律来解决矿物学和地质学的问题，并且表述了著名的“矿物的相律”。此后，他着重系统地研究交代现象，提出交代作用的正确定义，并将交代作用分为几个主要类别，这些类别直到今天还具有极大的意义。在第一次世界大战的年代里，他写了許多有关实用矿物学和化学工艺学（从挪威的拉瓦岩中提取铝，从黑云母中提取农业用的钾等等的论著）。

阿尔德施密特的地球化学和晶体化学的思想在其第一次世界大战以后所出版的許多著作中表述得明明白白。这些思想在主要方面都涉及到现代地球的基本问题，例如，阐明化学元素在自然界分布的规律和元素分布的方式。他常被一个老的而总是崭新的问题——物质的化学成份及其形态的关系——吸引。