

<https://doi.org/10.3176/biol.1981.3.11>

УДК 556.555.7

Айни ЛИНДПЕРЕ

## О НАКОПЛЕНИИ ЖЕЛЕЗА В РАЗНОТИПНЫХ ОЗЕРАХ ЭСТОНИИ

Всестороннее изучение донных отложений озер представляет собой важный раздел в комплексе лимнологических исследований. О содержании железа в донных отложениях озер Эстонии известно чрезвычайно мало. Зато многие наши озера обследованы по содержанию железа в воде; имеется также некоторое представление о круговороте его в толще воды посезонно (Eesti järved, 1968; Simm, 1975).

Геохимическое поведение железа в озерном бассейне седиментации обуславливается физико-географическими особенностями водосборных территорий и лимнологическими условиями самих озер (Семенович, 1958). Железо относится к числу наиболее динамичных элементов. В благоприятных условиях седиментации максимум накопления аутигенного и терригенного железа приходится на центральную часть котловины водоема. В данной статье исследуется накопление железа в верхнем слое донных отложений (в пелогене) профундали разных по трофности озер Эстонии.

### Материал и методика

Исследуемые 104 озера расположены рассеянно по всей территории республики. Они разные по площади (1—708 га), максимальной глубине (0,5—38 м), свойствам водосбора, условиям проточности и многим другим признакам. По трофности среди них 47 эвтрофных, 23 дисэвтрофных, 16 олиготрофных, 14 дистрофных и 4 семидистрофных. Список большинства обследованных озер приведен ранее (Линдпере, Утсал, 1979). В настоящую статью включены дополнительно химические данные о пелогене некоторых дистрофных (оз. Паказе, Нигула, Лоосалу, Койги-Пиккъярв, Удрику), олиготрофных (Июуга Линаярв), дисэвтрофных (Иьемыйза-Папи-Кайу, Рийска, Аэла, Яризе) и эвтрофных озер (Сааре, Каристе, Роони, Вазула и Каруярв на о-ве Сааремаа). Трофность обследованных озер определяли по А. Мязметсу (Mäemets, 1977).

Образцы донных отложений отбирали с 1971 по 1978 г. в наиболее глубоком месте озера из поверхностного слоя мощностью до 20 см.

Для определения зольных элементов воздушносухие пробы озеляли при температуре 500—550 °С. Потерю при прокаливании называли органическим веществом (ОВ). Зола обрабатывали смесью  $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$ . В солянокислом растворе определяли содержание железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , % на абсолютно сухое вещество) колориметрически сульфосалициловым методом (Аринушкина, 1961).

### Результаты и их обсуждение

По аккумуляции железа озера Эстонии являются разными. Количество железа в пелогене профундали озер колеблется в широких пределах — от 0,08 до 18,3%  $Fe_2O_3$  (таблица). Однако характерной чертой для озер Эстонии является низкая результативность железнакопления, поскольку пелоген большинства обследованных озер содержит его мало — меньше 3%  $Fe_2O_3$  (рис. 1). В пелогене  $\frac{1}{3}$  озер обнаружили от 3 до 10%  $Fe_2O_3$  и только в пяти озерах аккумулируется его много — больше 10%. Самыми богатыми железом озерами являются Карула Пиккъярв, Кээри, Лаватси, Консу и Рязтсма.

В оз. Рязтсма много железа обнаружено и в воде. По известным данным, вода этого озера отличается наибольшим содержанием железа. В придонном слое воды содержание  $Fe^{++} + Fe^{+++}$  достигало 9 мг/л. Высоким содержанием железа в воде отличаются также озера Карула Пиккъярв и Консу (Eesti järved, 1968). Обогащению придонного слоя воды железом способствуют дефицит кислорода и слабокислая реакция воды названных озер. Источниками железа этих озер являются подземные воды, выходящие на дне их. Присутствие железа можно предполагать в придонном слое воды оз. Лаватси (пока анализов на Fe не проводили), поскольку для озера характерны отсутствие кислорода и кислая реакция глубинных слоев во время стратификации. Большое содержание железа в донных отложениях не всегда указывает на обилие его в воде. В мелководном, проточном, богатом кислородом оз. Кээри в осадке много железа, а в воде нет.

Изучение накопления железа в разных по трофности озерах показывает, что по содержанию железа самыми бедными являются дистрофные (рис. 2). В их пелогене количество железа в среднем составило 0,71%  $Fe_2O_3$  (таблица).

Статистический анализ данных химического состава пелогена выявил тесные положительные корреляции ( $r$  около 0,8) между содержанием железа, кремния, алюминия и калия (составные элементы алюмосиликатов). Следовательно, в пелогене дистрофных озер преобладают силикатные соединения железа. Этими являются глинистые минералы — гидрослюды и хлориты. Названные силикатные минералы, а также дру-

Содержание общего железа в пелогене профундали озер Эстонии ( $Fe_2O_3$ , % на абсолютно сухое вещество)

Озера	Количество озер	Крайние величины	Среднее арифметическое	Среднеквадратичное отклонение	Коэффициент вариаций, %
Дистрофные	14	0,08—2,11	0,71	0,61	86
Олиготрофные	15*	0,59—3,09	1,38	0,78	56
Семидистрофные	4	0,73—2,78	1,61	0,89	55
Дисэвтрофные	23	0,30—15,4	3,72	3,49	94
Эвтрофные	47	0,50—18,3	4,75	3,57	75
Всего	104	0,08—18,3	3,39	3,39	100

\* Из-за исключительно высокого содержания железа оз. Рязтсма не учитывалось при статистическом анализе.

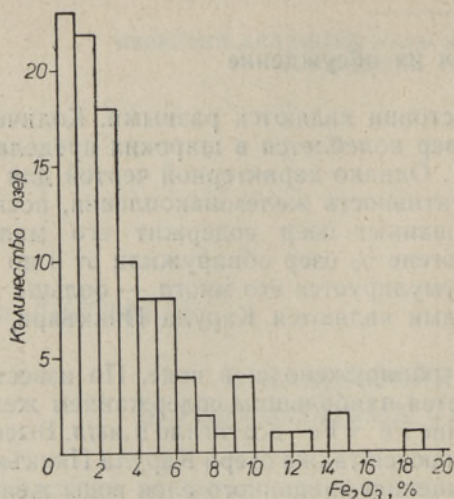


Рис. 1. Гистограмма распределения содержания железа в пелогене озер Эстонии.

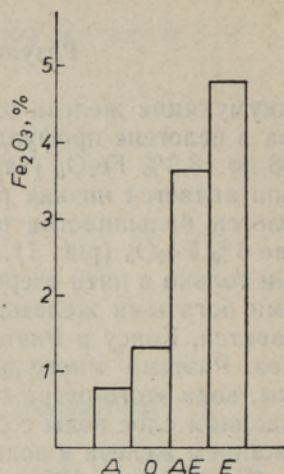


Рис. 2. Сравнительное содержание железа в пелогене дистрофных (Д), олиготрофных (О), дисэвтрофных (ДЕ) и эвтрофных (Е) озер.

гие кристаллические соединения, в том числе такие железосодержащие соединения как пирит, гетит, гематит, сидерит и кордиерит, определены в пелогене рентгендифрактометрически нами уже ранее (Линдпере, Утсал, 1979). По этим данным, глинистые минералы в большинстве случаев не составляют больше 20% кристаллической фазы пелогена. Концентрация остальных железосодержащих минералов крайне мала. Если учесть тесную положительную корреляцию между содержанием железа и фосфора ( $r=0,89$ ), в пелогене дистрофных озер должны присутствовать также соединения железа с фосфором.

Связь железа с ОВ оказалась отрицательной ( $r=-0,81$ ). Следовательно, чем богаче пелоген ОВ, тем он беднее железом (рис. 3, Д). Для пелогена озер, расположенных в верховых болотах (оз. Паказе, Нигула, Лоосалу, Койги Пиккъярв и озеро верхового болота Эндла), характерно крайне низкое содержание железа (ниже 0,3% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Из них наименьше железа аккумулирует озерко верхового болота Эндла. Названные озера изолированы от минеральных почво-грунтов и поэтому терригенный сток минеральных веществ в водоем отсутствует. Озера группы Партси (Пикамяэ, Партси Сааръярв, Виросте, Холванди Кивиярв), а также оз. Орава Кывераярв не являются типичными дистрофными озерами, поскольку они обладают хорошим контактом с минеральными почвами. Расположены они на окультуренном ландшафте. Пелоген их значительно обогащен железом (1,0—1,6% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Наибольшее количество железа обнаружили в оз. Орава Кывераярв (2,11%). Можно согласиться с П. Алхоненом (Alhonen, 1971) в том, что признаком дистрофикации озер служит высокое содержание аллохтонных органических веществ и низкое содержание железа в донных отложениях.

По содержанию железа олиготрофные озера существенно (при уровне значимости 0,05) богаче дистрофных (таблица). С помощью статистического анализа в олиготрофных озерах выявлены, как и в случае дистрофных озер, тесные положительные коррелятивные связи между содержанием железа и других элементов силикатного происхождения.

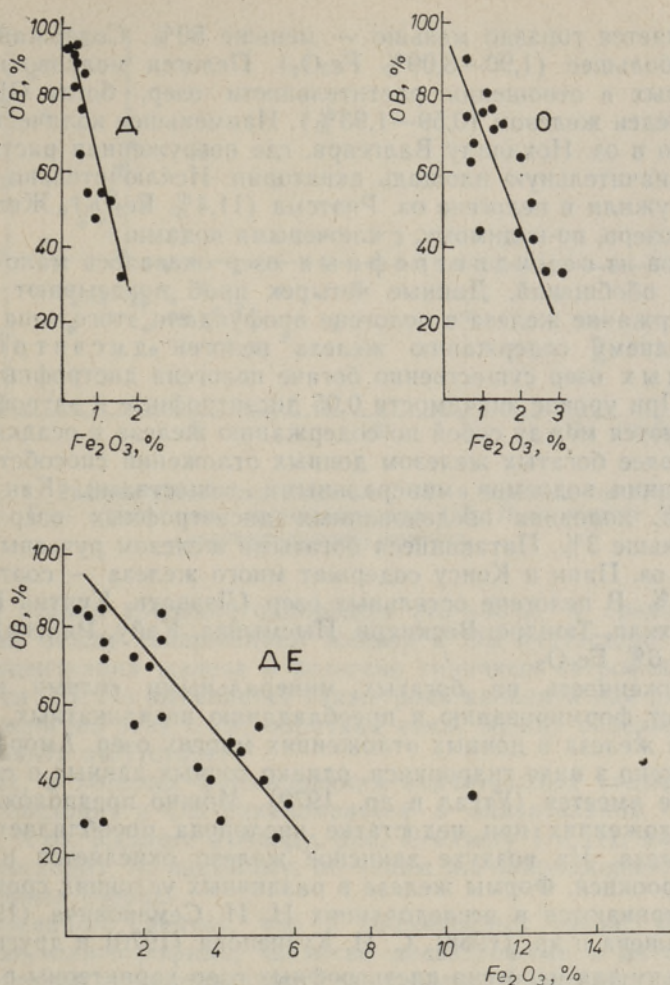


Рис. 3. Связь между содержанием железа и органического вещества (ОВ) в пелогене дистрофных (Д), олиготрофных (О) и дисэвтрофных (ДЕ) озер.

Можно предположить, что гидрослюды и хлориты являются одними из преобладающих соединений железа в пелогене олиготрофных озер. Из-за превалирования минеральных соединений железа в пелогене, связь его с содержанием ОВ оказалась отрицательной, но в то же время тесной ( $r = -0,81$ ). Очевидно, концентрация железа в пелогене олиготрофных озер зависит от количества накопленного в нем ОВ как разбавителя, а последнее, в свою очередь, — от количества примарной продукции этих озер. Чем больше в озере накапливается ОВ, тем меньше доля соединений железа в пелогене, и наоборот (рис. 3, О).

ОВ олиготрофных озер преимущественно автохтонное и результативность седиментации его зависит главным образом от продукции высшей водной растительности в водоеме. Как известно, развитие макрофитов в глубоком озере слабое. Поэтому по сравнению с мелководными озерами в пелогене профундали глубоких озер (макс. глубина 25—33 м) этой группы (оз. Вайке Палкна, Удсу, Кооркюла Валгеярв, Пийганди)

ОВ накапливается гораздо меньше — меньше 50%. Содержание железа в них наибольшее (1,90—3,09%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Пелоген мелковолокных, более продуктивных в отношении растительности озер, богат ОВ (больше 50%), но беден железом (0,59—1,93%). Наименьшее количество железа обнаружено в оз. Нохипалу Валгеярв, где погруженная растительность занимает значительную площадь акватории. Исключительно много железа обнаружили в пелогене оз. Рязтсма (11,4%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Железо поступает в это озеро, по-видимому, с ключевыми водами.

Образцов из семи дистрофных озер оказалось мало для более подробных обобщений. Данные четырех проб показывают (таблица) малое содержание железа в пелогене профундали этого типа озер.

По среднему содержанию железа пелоген дисэвтрофных и эвтрофных озер существенно богаче пелогена дистрофных и олиготрофных. При уровне значимости 0,05 дисэвтрофные и эвтрофные озера не различаются между собой по содержанию железа в осадках. Формированию более богатых железом донных отложений способствует улучшение питания водоемов минеральными веществами. Как видно из рис. 3, ДЕ, половина обследованных дисэвтрофных озер содержит железа меньше 3%. Питающиеся богатыми железом ручьевыми водами проточные оз. Папи и Консу содержат много железа — соответственно 10,4 и 15,4%. В пелогене остальных озер (Лээвати, Куртна Ныммеярв, Солда, Мяхкли, Тюндре, Вескиярв, Йемейза, Кайу, Рийска) содержание его 3—6%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Расположенность на богатых минеральными солями водосборах способствует формированию и преобладанию несиликатных, аморфных соединений железа в донных отложениях многих озер. Аморфное железо обнаружено в виде гидроокиси, однако точных данных о содержании его пока не имеется (Утсал и др., 1979). Можно предположить, что в донных отложениях при недостатке кислорода преобладает закисная форма железа. На воздухе закисное железо окисляется и выпадает в виде гидроокиси. Формы железа в различных условиях среды подробно рассматриваются в исследованиях Н. И. Семеновича (1958, 1960), К. И. Лукашева и др. (1968), С. И. Кузнецова (1970) и других авторов.

Поскольку для пелогена дисэвтрофных озер характерны разнообразные по содержанию и преобладанию соединения железа, тесные связи между содержанием железа и других элементов отсутствуют. Корреляция между содержанием железа и ОВ оказалась слабой ( $r = -0,51$ ). Концентрация железа в пелогене дисэвтрофных озер зависит от стока железа в озеро, а также от результативности седиментации ОВ.

Эвтрофные озера также являются разными по содержанию железа в пелогене (рис. 4). В одной группе эвтрофных озер (рис. 4, I) железа накапливается мало — меньше 3%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Таковыми являются мягководные эвтрофные (бывшие олиготрофные) озера (Орава Мыйзаярв, Партси Кыртсиярв, Петаярв, Сикути, Тсолго, Мустьярв), а также мелководные жестководные, в которых литораль преобладает над пелагиалью или последняя совсем отсутствует (оз. Елиствере, Кайавере, Каруярв, Сойтсыярв). В них накапливается довольно много ОВ. Аккумуляция железа в этой группе озер проходит по таким же закономерностям, как и в случае олиготрофных озер; ОВ выступает в роли разбавителя железа.

Накопление железа во второй группе эвтрофных озер (рис. 4, II) имеет свои отличительные особенности. К этой группе относятся типичные эвтрофные озера, аккумулярующие кальцит. Во многих озерах кальцит формируется в больших количествах (Линдпере, Утсал, 1979). Пелоген жестководных водоемов содержит железо в различных количествах (1—18%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) — в большинстве случаев больше 3%. По содер-

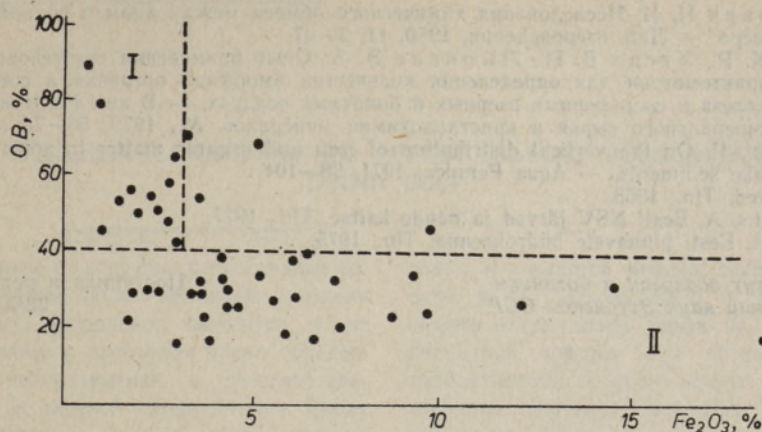


Рис. 4. Распространенность железа и ОВ в пелогене эвтрофных озер. I — группа озер, аккумулирующих ОВ, II — группа озер, аккумулирующих кальцит.

жанию ОВ осадки довольно однородны (15—40%, в среднем 28%). Взаимосвязь между содержанием железа и ОВ отсутствует. Следовательно, концентрация железа в пелогене типичных эвтрофных озер не определяется ОВ. Не выявляется также роль кальцита как разбавителя железа в пелогене этих озер; обратная связь между содержанием железа и кальцита отсутствует.

В озерах, в которых формирования значительных количеств кальцита не происходит и ОВ накапливается в значительном количестве (например, в оз. Каллете и Ахеру, рис. 4, между I и II), аккумуляция железа происходит, по-видимому, по таким же закономерностям, как и в дисэвтрофных озерах.

Из изложенного следует, что в мягководных озерах всех типов (дистрофные, олиготрофные, частично дисэвтрофные и эвтрофные), а также в некоторых жестководных (макрофитных) концентрация железа в пелогене зависит в первую очередь от интенсивности седиментации ОВ. В большинстве жестководных озер (эвтрофного и дисэвтрофного типов) результативность накопления железа, наоборот, зависит в первую очередь от стока соединений железа в озеро. Эти обстоятельства свидетельствуют о том, что мягководные озера питаются железом более однородно, чем жестководные. Различие проявляется также в (питающих озера) соединениях железа; озера с низким процентным содержанием железа в пелогене (мягководные и некоторые жестководные) питаются главным образом обломочным железом, а озера с высоким содержанием железа (большинство жестководных) — растворимыми его солями.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. МГУ, 1961.  
 Кузнецов С. И. Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. Л., 1970.  
 Линдпере А., Утсал К. Рентгендифрактометрическое исследование пелогена профундали озер Эстонии. — Изв. АН ЭССР. Биол., 1979, 28, 137—147.  
 Лукашев К. И., Хомич А. А., Жуховицкая А. Л., Замяткина А. А. Геохимия железа в озерных водоемах Белоруссии с неустойчивой окислительно-восстановительной средой. — Докл. АН БССР, 1968, 12, 722—724.  
 Семенович Н. И. Лимнические условия накопления железистых осадков в озерах. — Тр. лаб. озероведения, 1958, 6, 5—188.

- Семенович Н. И. Исследования химического обмена между дном и водной массой озера. — Лаб. озероведения, 1960, 11, 3—47.
- Утсал К. Р., Утсал В. И., Лыокене Э. А. Опыт применения рентгеновской дифрактометрии для определения количества аморфной органики и соединений железа в современных озерных и болотных осадках. — В кн.: Рентгенография минерального сырья и кристаллохимия минералов. М., 1979, 56—76.
- Alhonen, P. On the vertical distribution of iron and organic matter in some Finnish lake sediments. — *Aqua Fennica*, 1971, 98—104.
- Eesti järved, Tln., 1968.
- Mäemets, A. Eesti NSV järved ja nende kaitse. Tln., 1977.
- Simm, H. Eesti pinnavete hüdrokeemia. Tln., 1975.

Институт зоологии и ботаники  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
22/XI 1980

Aini LINDPERE

### RAUA AKUMULATSIOON ERI TÕUPI EESTI JÄRVEDES

Eesti järvede pindmises settekihis leidub 0,08—18,3% rauda ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Kõige vähem on seda düstroofsetes, tunduvalt rohkem oligotroofsetes järvedes. Kõige raurikkamad on düseutroofsete ja eutroofsete järvede setted, kusjuures need omavahel raua hulga poolest oluliselt (usaldusnivool 5%) ei erine.

Aini LINDPERE

### ACCUMULATION OF IRON IN DIFFERENT TYPES OF ESTONIAN LAKES

The iron content of surface sediments, collected in 104 lakes, varied between 0.08 and 18.3%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (of 110 °C dry wt).

The concentration of iron was lowest in the sediments of dystrophic lakes, while the sediments of oligotrophic lakes had a considerably higher iron content. The highest concentration of iron was found in the sediments of dyseutrophic and eutrophic lakes. The iron content difference between these two lake types was statistically insignificant.